

Nr 124 · 1975

Mätning, analys och optimering av skogsmaskiners driftsäkerhet

*Logging-machine failure avoidance:
Identification and measurement of key parameters*

SVEN-ÅKE AXELSSON

Abstract

OCD 307: 355

In a project on Logging-Machine Failure Avoidance, relevant experience in operating technically complex machinery in other industries has been applied to optimizing logging-machine operations.

Key machine and operational parameters have been identified and evaluated, with emphasis on reliability and maintainability and their effect on machine availability.

New definitions of time elements and procedures have been developed to ensure accurate definition and measurement of machine parameters necessary for control and improvement of machine operations. The procedures are being applied to collection and analysis of field data on 20 Koehring Short-Wood Harvesters on regular operations in Eastern Canada.

The information achieved can be used for routine control of operations, prompt decision-making on operational and technical improvements, longer-term analysis for optimizing machine operations and unbiased evaluation and comparison of machine performance.

Ms received 14th Oct. 1974

LiberFörlag/Allmänna Förlaget

ISBN 91-38-02279-6

Berlingska Boktryckeriet, Lund 1975

Innehållsförteckning

Förord	5	6 Underhållsmässighet (<i>maintainability</i>) .	18
1 Inledning	6	7 Tillgänglighet (<i>availability</i>)	22
2 Undersökningens genomförande	7	8 Driftsäkerhet	25
3 Problemformulering	9	9 Optimeringsanalyser	29
4 Identifiering av kostnadspåverkande parametrar	11	Sammanfattning	34
5 Funktionssäkerhet (<i>reliability</i>)	13	Summary	35
		Litteraturförteckning	37

Förord

Under åren 1970—72 hade jag tillfälle att leda och genomföra ett forskningsprojekt "Availability of New Logging Machines and Causes of Non-Productive Time" vid the Logging Research Division, Pulp and Paper Research Institute of Canada, Montreal. Projektet och resultaten har presenterats i olika rapporter utgivna vid Institutet. Den föreliggande lilla skriften är en sammanfattning av de mer grundläggande resultaten av projektet, och utgör tillsammans med tre av rapporterna från Institutet min doktorsavhandling i ämnet Skogsteknik vid Skogshögskolan, i samband med avläggandet av skoglig doktorsexamen.

Eftersom det för närvarande inte föreligger någon allmänt accepterad nomenklatur i Sverige för de i projektet behandlade frågorna betr. skogsmaskinens stillestånd, underhåll och optimala utnyttjande, har i viss utsträckning den nordamerikanska terminologin använts. I kapitel 8, Driftsäkerhet, framläggs emellertid i samband med diskussionen av de i projektet utvecklade analysmetoderna ett förslag till benämningar på svenska av viktigare maskin- och operativa parametrar. Detta förslag har utformats i samråd med Forskningsstiftelsen Skogsarbeten, med utnyttjande av de principer som under de senaste åren alltmer börjat tillämpas inom den moderna tillförlitlighets-

tekniken.

Jag ber att få framföra mitt uppriktiga tack till mina kolleger och vänner vid Pulp and Paper Research Institute of Canada för värdefull hjälp vid projektets planerande och genomförande, och för all den äkta kanadensiska generositet som mötte mig under arbetets gång. Särskilt vill jag nämna Mr. Lowell Besley, dåvarande Director, Woodlands Research Division, och Dr. Herbert I. Winer, Director, Logging Research Division, samt Mr. B. Laird Nelson, Senior Technician vid datorn och outtröttlig assistent vid många field trips.

Jag ber också att få tacka professor Anders Staaf vid Skogshögskolans institution för skogsteknik, avdelning I, för hans intresse för detta forskningsprojekt på andra sidan Atlanten och för hans välvilliga stöd av mitt arbete fram till doktorsexamen, samt skog. lic. Sven Embertsén — skogsteknisk chef vid Svenska Cellulosa AB, Sundsvall, och lärarkollegiets opponent — som vid sin sakkunniga granskning av avhandlingen bidragit med värdefulla synpunkter.

Slutligen vill jag gärna tacka min Ulla, entusiastisk och uppmuntrande hustru.

Lycksele i mars 1974

Sven-Åke Axelsson

1 Inledning

Den fortlöpande rationaliseringen och mekaniseringen av drivningsarbetet i skogsbruket under senare år har medfört en avsevärd sänkning av dagsverksåtgången och därmed bidragit till att bibehålla kostnaderna för virkesråvaran på en konkurrenskraftig nivå. Sedan terrängtransporten och barkningen med framgång helt mekaniserats under 1960-talet, har nu försöken att fullständigt mekanisera hela avverkningsarbetet intensifierats, och maskiner har utvecklats för främst kvistning och kapning, men också fällning. Dessa försök till helmekanisering genom införandet av tekniskt avancerade och komplexa avverkningsmaskiner av typen processorer och skördare har emellertid inte alltid varit lika framgångsrika. Både tillverkare och brukare av dessa maskiner har vunnit värdefull och nödvändig erfarenhet, men den avsedda sänkningen av avverkningskostnaderna har ofta varit begränsad och ibland obefintlig. Vi kan nu konstatera, att det tar betydligt längre tid än man från början räknade med, att vidareutveckla prototyper till effektivt brukbara maskiner och utnyttja deras potentiella kapacitet i praktisk drift. Steget från prototyp till användbar bruksmaskin har medfört åtskilliga svårösta problem, som ibland har lett till att även till synes lovande nykonstruktioner aldrig kommit längre än till prototypstadiet.

Bland orsakerna till de ofta underskattade

problemen med de nya maskintyperna kan främst nämnas sämre driftsäkerhet och högre underhållskostnader (reparation och skötsel) än man kalkylerat med, ofta i kombination med lägre produktion per utnyttjad timme än vad man kunnat förvänta med stöd av tidsstudier av maskinerna på prototypstadiet.

För att studera dessa frågor påbörjades hösten 1970 ett större forskningsprojekt "Availability of New Logging Machines and Causes of Non-Productive Time", vid the Logging Research Division, Pulp and Paper Research Institute of Canada (PPRIC), Montreal, med skog. lic. Sven-Åke Axelsson som projektledare. De viktigare resultaten från projektet under åren 1970—1972, som sammanfattas här, har redovisats i följande tre rapporter:

- Axelsson, S.-Å.** Evaluation of Logging-Machine Prototypes: Arbomatik Processor. Woodl. Res. Rep. Pulp Pap. Res. Inst. Can., WR/35, 1971, pp. 18. Litt.fört. [15].
- Axelsson, S.-Å.** Repair Statistics and Performance of New Logging Machines: Koehring Short-Wood Harvester/Report 1. Logg. Res. Rep. Pulp Pap. Res. Inst. Can., LRR/47, 1972, pp. 59. [16].
- Axelsson, S.-Å.** Logging-Machine Failure Avoidance: Identification and Measurement of Key Parameters. Logg. Res. Rep. Pulp Pap. Res. Inst. Can., LRR/48, 1972, pp. 78. [17].

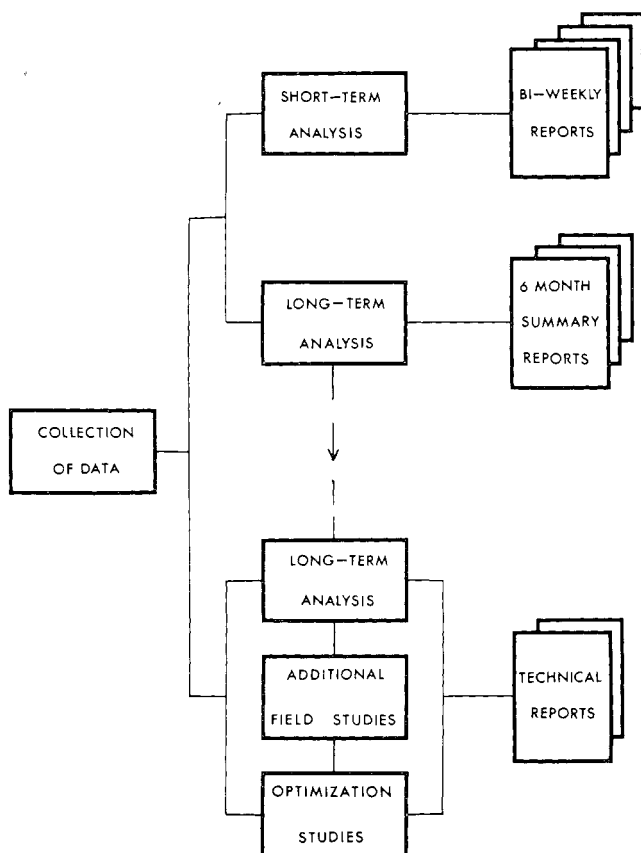
2 Undersökningens genomförande

Projektet inleddes med en omfattande litteraturgenomgång beträffande ovan berörda problem, samt insamling av aktuell information från, förutom skogsbruket i Nordamerika och Skandinavien, främst militär verksamhet och flyg-, elektronik- och bilindustrin, med särskild inriktning på befintliga metoder för analys av tekniskt avancerade maskiners och systems driftsäkerhet.

Under projektets gång utvecklades en teoretisk modell för identifiering, mätning och värdering av parametrar som påverkar skogsmaskiners driftsäkerhet under normalt förekommande drivningsförhållanden, med

tillämpning av den moderna tillförlitlighetsteknikens principer.

För att utarbeta och prova metoder för insamling av data i fält, och för utveckling av analysmetoder med användning av dator, genomfördes under våren 1971 en pilotstudie omfattande två Koehring Short-Wood Harvesters i drift hos Great Lakes Paper Company, Ontario. (Koehring Harvester är en enmansbetjänad kanadensisk skördare, världens första i sitt slag, för fällning, automatisk kvistning och kapning, samt terrängtransport av virket. Vikten är ca 45 ton olastad och priset ca C\$150 000.)



Figur 1. De olika faserna av datainsamling och resultatredovisning i projektet. Från [17].
Outline of the project. From [17].

Med dessa studier som bakgrund startades hösten 1971 ett program för insamling av underhållsstatistik, *Repair Statistics Program*. Programmet omfattar insamling, enligt en fastställd, noggrant specificerad metodik, av fältdata beträffande driftsäkerhet, driftsavbrott, underhåll, produktion osv., samt kostnader, från ett tjugotal Koehring Harvesters insatta i ordinarie produktion hos åtta skogsföretag i östra Canada.

Avsikten med denna insamling av en betydande mängd data är tvåfaldig: att rutinemässigt sammanställa och distribuera exakt information beträffande de i studierna ingående maskinerna till brukare och tillverkare; och att analysera fältdata utan direkt inriktning på speciell maskintyp för att utveckla förbättrade metoder för optimering av tekniskt avancerade skogsmaskiners användning.

De olika faserna av datainsamling och resultatredovisning illustreras i figur 1. Data, som insamlas kontinuerligt av skogsföretagens fältpersonal och kompletteras med

hjälp av skakur, skickas varje vecka till PPRIC för kontroll, sammanställning och rutinemässig analys via dator. Resultatsammanställning för de studerade maskinerna har distribuerats i en serie *Bi-weekly Reports* (utskickade var fjortonde dag) sedan september 1971 [17, 18, 20]. Resultaten från analys av data från de sex första månaderna har publicerats i rapporten [16]. Forskningsresultat av mer allmänt intresse för optimering av användningen av avverkningsmaskiner har publicerats i den första tekniska rapporten [17]. I rapporten [15] redovisas exempel på användningen av kortvariga (en vecka) tidsstudier för analys av en avverkningsmaskins kapacitet, med särskild inriktning på den potentiella produktiviteten [22, 26, 34].

Det ovan beskrivna projektet fortsätter vid PPRIC och har under 1973—74 utvidgats. Datainsamling och resultatredovisning omfattar nu dels flera Koehring Harvesters och dels också andra avverkningsmaskiner.

3 Problemformulering

Undersökningarna har syftat till att

- ☐ identifiera parametrar av betydelse för optimering av tekniskt avancerade skogsmaskiners driftsäkerhet och tillgänglighet,
- ☐ utveckla metoder för mätning, värdering och analys av dessa parametrar,
- ☐ prova och tillämpa dessa metoder på nya avverkningsmaskiner i ordinarie drift.

Problemet att till rimliga kostnader hålla tekniskt avancerade och komplexa maskiner i funktionsdugligt skick under krävande yttre förhållanden är inte unikt för skogsbruket. Resultatet av en omfattande litteraturgenomgång (litteraturförteckning sid. 37) visar att många av de problem vi möter i dagens försök till fullständig mekanisering av avverkningsarbetet redan har angripits och lösts inom andra industrier och områden. Tillförlitlighetsteknikens¹ grundläggande principer, som utnyttjas för optimering av tekniskt avancerade maskiners användning inom främst militär verksamhet (US Air Force och Army) samt flyg-, elektronik- och bilindustrin, har modifierats, utvecklats och tillämpats i det genomförda forskningsprojektet [3, 5, 12, 14, 27, 33, 35, 41, 44, 45].

Avverkningskostnaden per kubikmeter för en given avverkningsmaskin är en funktion av de två faktorerna: *den totala maskinkostnaden per produktiv maskintimme*² (kronor/grundtimme) och *produktiviteten* (antal avverkade kubikmeter/grundtimme). Ett flertal olika parametrar påverkar en eller båda faktorerna i varierande utsträckning. Ökade insatser av dessa parametrar (ökad investering) medför i princip en avtagande avverkningskostnad per kubikmeter fram till en bestämd punkt, men bortanför denna punkt blir fortsatta investeringar inte längre lönsamma (se figur 2). Kortfattat uttryckt gäller problemet att identifiera de påverkan-

de parametrarna, uttrycka dem kvantitativt i en ekvation och sedan finna minimipunkten på den mot ekvationen svarande kostnadskurvan. Den slutliga lösningen på problemet ger det optimala förhållandet mellan de påverkande parametrarna, och den optimala insats av *maskinparametrar* och *operativa parametrar* som erfordras för att minimera avverkningskostnaden. Den skisserade analysen kräver tillgång till detaljerad information om maskiner och operativa förhållanden i fält, i form av datauppgifter som definierats noggrant och som insamlats på ett likformigt sätt [7, 10, 13, 19, 25, 37, 39].

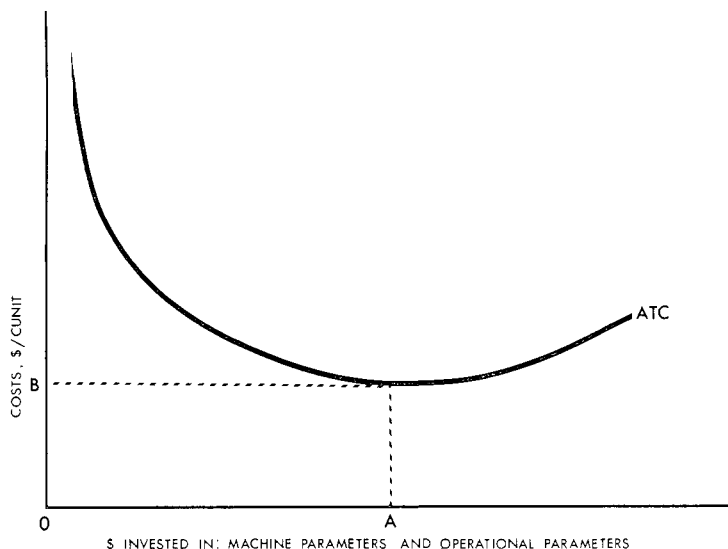
¹ "Tillförlitlighetstekniken i sin helhet omfattar i modern utformning:

beräknings- och analysmetoder för att bestämma funktionssannolikhet, tillgänglighet, felintensitet eller annat lämpligt tillförlitlighetsmått,

tekniska och administrativa metoder för att erhålla, uppehålla och kontrollera avsedd tillförlitlighet samt

de delar av matematisk statistik och andra teoretiska och praktiska områden som erfordras i samband med dessa metoder." Från [14].

² Produktiv maskintimme (Productive Machine Hour, PMH) överensstämmer med begreppet grundtid arbete (G_{15} arbete) dvs. den tid som åtgår för arbetsuppgiftens egentliga lösande jämte smärre uppehåll vars längd inte överstiger 15 minuter, se vidare sid. 22.



Figur 2. Minimering av en avverkningsmaskins medelkostnad per m^3 (ATC, Average Total Cost) genom optimering av investeringarna beträffande maskin- och operativa parametrar. Den optimala investeringen A ger den lägsta kostnaden per m^3 , B. Från [17].

Minimizing the average total cost per cunit (ATC) of a logging machine by optimizing the investment on machine and operational parameters. The optimum investment of A, results in the minimum cost per cunit, B. From [17].

4 Identifiering av kostnadspåverkande parametrar

De viktigare parametrar som påverkar avverkningskostnaden för en given maskin sammanfattas i följande uppställning enligt två principer. Först grupperas parametrarna efter sin respektive inverkan på maskinkostnaden per grundtimme och på produktiviteten, och därefter redovisas parametrarnas samband med maskin- respektive operativa karakteristika, samt dessutom en grupp interrelaterade parametrar.

A. Kostnads- och produktivitetsparametrar

A-I. *Kostnad per grundtimme*

A-II. *Produktivitet*

B. Maskin- och operativa parametrar

B-I. *Maskinparametrar*

B-II. *Operativa parametrar*

B-III. *Interrelaterade parametrar*

A-I. *Kostnad per grundtimme*

1. Kapitalkostnad (avskrivning, ränta, försäkring)
2. Underhållskostnad (reparation, skötsel, bränsle etc.)
3. Förarkostnad
 1. Kapitalkostnad
 - 1.1. Inköpspris
 - 1.2. Totala antalet grundtimmar under maskinens användningstid
 - 1.2.1. Maskinens ekonomiska livslängd
 - 1.2.2. Scheduling intensity ("skiftintensitet")
 - 1.2.3. Grundtimmar per skift (teknisk utnyttjandegrad, Utilization)
 - 1.2.3.1. Fältorganisationens effektivitet
 - 1.2.3.2. Maskinell tillgänglighet (Mechanical Availability)
 - 1.2.3.2.1. Funktionssäkerhet (reliability)
 - 1.2.3.2.2. Underhållsmässighet (maintainability)
 2. Underhållskostnad (kr/grundtimme)
 - 2.1. Funktionssäkerhet
 - 2.2. Underhållsmässighet
 - 2.3. Kostnad för reservdelar (och bränsle etc.)
 - 2.4. Underhållsorganisationens effektivitet
 3. Förarkostnad (kr/grundtimme)

3.1. Kostnad per utnyttjad timme

3.2. Antal grundtimmar per skift

A-II. *Produktivitet (m³/grundtimme)*

1. Omgivningsfaktorer (bestånd, terräng, klimat etc.)
2. Maskinens arbetssätt och utformning
3. Maskinens tekniska karakteristika relativt förarens fysiologiska och psykiska förutsättningar och begränsning
4. Drivningsorganisation (planering, övervakning, kontroll)
5. Förarprestation (urval, utbildning, träning, motivation)

B-I. *Maskinparametrar*

1. Maskinell tillgänglighet
2. Funktionssäkerhet
3. Underhållsmässighet
4. Maskinens tekniska karakteristika relativt förarens fysiologiska och psykiska förutsättningar och begränsning

B-II. *Operativa parametrar*

1. Scheduling intensity
2. Fältorganisationens effektivitet
 - 2.1. Underhållsorganisationens effektivitet
 - 2.1.1. Underhållsplanering, -övervakning, -kontroll
 - 2.1.1.1. Reparatorernas utbildning, träning och motivation
 - 2.1.1.2. Förebyggande underhåll
 - 2.1.1.3. Utrustning och hjälpmedel för underhåll
 - 2.1.1.4. Tillgång till reservdelar
 - 2.2. Drivningsorganisationens effektivitet
 - 2.2.1. Drivningsorganisation (planering, övervakning, kontroll)
 - 2.2.1.1. Förarprestation (urval, utbildning, träning, motivation)
 - 2.2.1.2. Vidareutbildning av planerare och förmän
 - 2.2.1.3. Antal maskiner per drivnings-trakt

B-III. *Interrelaterade parametrar*

1. Omgivningsfaktorer (bestånd, terräng, klimat etc.)
2. Maskinens arbetssätt och utformning
3. Maskinens ekonomiska livslängd
4. Inköpspris
5. Förarkostnad per utnyttjad timme

Vid de i undersökningen genomförda studierna av dessa parametrar har huvudvikten lagts vid analys av *funktionssäkerhet* (*reliability*), *underhållsmässighet* (*maintainability*) och *tillgänglighet* (*availability*), dvs. de grundläggande begreppen inom den moderna tillförlitlighetstekniken.

5 Funktionssäkerhet (reliability)

En maskins *funktionssäkerhet* (även benämnd funktionssannolikhet) kan definieras som *sannolikheten att maskinen i fråga kommer att fullgöra den avsedda funktionen utan driftsavbrott¹ under en specificerad tidsperiod och under specificerade yttre förhållanden* [2, 12, 29, 30, 32, 44]. För att en kvantifiering av denna sannolikhet skall bli meningsfull är det nödvändigt att specificera:

- avsedd funktion
- avsedd tidsperiod
- definition av driftsavbrott
- operativa och andra yttre förhållanden.

Sannolikheten är ett uttryck för det troliga att en händelse (i detta fall *success*) skall inträffa och kan antaga ett värde från 0 till 1. Funktionssäkerheten hos en maskin kan alltså variera mellan noll (vilket är lika med att den aldrig fungerar) och ett (vilket motsvarar användning utan något enda driftsavbrott under den specificerade tidsperioden).

Om man till exempel genom insamling av data beträffande driftsavbrott för en hydraulcylinder har beräknat funktionssäkerheten till 0,80 under en tidsperiod av 1 000 grundtimmar, innebär detta att sannolikheten för att inte något driftsavbrott skall inträffa under 1 000 grundtimmars användning är 80 % eller med andra ord: i en oändligt stor serie av sampel om 10 stycken av denna cylindertyp kan 8 cylindrar förväntas klara sin funktion utan något driftsavbrott under 1 000 grundtimmar, medan 2 cylindrar följaktligen förväntas få driftsavbrott under tidsperioden. Noggrannheten i denna förutsägelse beror främst på storleken och variationerna i det sampel som funktionssäkerheten beräknas från. I praktiken kan förutsägelsen också störas av icke väntade yttre förhållanden, såsom skador genom olyckshändelse och felaktig användning.²

Funktionssäkerheten hos en maskin som består av flera enheter är direkt beroende av dessa enheters individuella funktionssäkerhet [2, 3, 12]. Förhållandet mellan maskinens och enheternas funktionssäkerhet kan vara enkelt eller komplicerat, i princip beroende på om ett driftsavbrott i en enhet medför att hela maskinen får driftsavbrott³ (inte kan fullgöra avsedd funktion) eller inte.⁴ I det enklaste fallet, då driftsavbrott i vilken som helst av de ingående enheterna resulterar i att maskinen får driftsavbrott, blir maskinens funktionssäkerhet lika med produkten av de individuella enheternas funktionssäkerhet.

För ett system bestående av n stycken delsystem är

$$R_s = R_1 \times R_2 \times R_3 \times \dots \times R_n$$

där R_s är systemets funktionssäkerhet (reliability) och R_i funktionssäkerheten hos delsystem nummer i .

För en tänkt avverkningsmaskin bestående av 10 stycken enheter (kran, processordel etc.) med följande funktionssäkerheter

$R_1 = 0,99$	$R_6 = 0,98$
$R_2 = 0,98$	$R_7 = 0,96$
$R_3 = 0,99$	$R_8 = 0,97$
$R_4 = 0,97$	$R_9 = 0,98$
$R_5 = 0,99$	$R_{10} = 0,99$

blir alltså avverkningsmaskinens funktionssäkerhet (R_s)

$$R_s = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_{10} = 0,817$$

¹ Uttrycket driftsavbrott (=fel) används här som en motsvarighet till engelskans failure. I konsekvens härmed används "utan driftsavbrott" synonymt med success (eller survival).

² S.k. missbruksfel, dvs. fel som orsakas av onormal påkänning. Vid statistisk bearbetning bortser man i regel från missbruksfel [14].

³ S.k. funktionshindrande fel [14].

⁴ S.k. funktionstillåtande fel [14].

Exemplet kan också användas för att illustrera hur funktionssäkerheten hos en viss enhet, bestående av 10 komponenter, påverkas av dessa komponenters individuella funktionssäkerhet.

Det torde framgå av exemplet, att när ett system som en tekniskt avancerad avverkningsmaskin består av hundratals delsystem (enheter och komponenter), måste den individuella funktionssäkerheten hos samtliga dessa komponenter vara mycket hög, för att en acceptabel funktionssäkerhet hos maskinen i fråga skall kunna åstadkommas. Detta illustrerar storleksordningen av det aktuella problemet att konstruera och tillverka tekniskt avancerade avverkningsmaskiner för användning under de ofta extremt svåra yttre förhållandena i fält. För att säkerställa ett framgångsrikt utnyttjande av sådana maskiner måste extraordinära krav beträffande komponenternas funktionssäkerhet uppfyllas jämfört med de flesta andra industrier, som kan erbjuda gynnsammare yttre förhållanden både för drift och för underhåll (reparation och skötsel).

Figur 3 visar den grundläggande s.k. badkars-kurvan, som är representativ för de driftsavbrott som inträffar under livslängden för en maskin i regelbunden (ej cyklisk) användning, exempelvis en avverkningsmaskin [30]. Figur 4 illustrerar den motsvarande genomsnittliga driftsavbrottsgraden⁵ (*failure-rate*) för 13 Koehring Harvesters under tidsperioden 0 till 4 000 grundtimmar [17], (studierna är planerade att fortsätta under maskinernas livslängd).

I badkarskurvan kan utläsas tre stadier av intresse: en kort inkörningsperiod under vilken driftsavbrottsgraden minskar med tiden (*begynnelseperioden*), en längre period med praktiskt taget konstant driftsavbrottsgrad (*bästperioden*), och slutligen en period då driftsavbrottsgraden snabbt stiger, vilket sammanhänger med att maskinen är tekniskt försliten (*slutperioden*). Det kan ifrågasättas om kurvan för avverkningsmaskiners driftsavbrottsgrad kommer att visa en motsvarande kraftig stigning vid slutet av maskinens livslängd. Eftersom olika maskinkomponenter vanligen byts ut kontinuerligt p.g.a. förslitning, är det i stället sannolikt att drifts-

avbrottsgraden kommer att förbli relativt konstant även efter det att maskinens ekonomiska livslängd uppnåts, dvs. maskinen byts ut mot en ny maskin p.g.a. teknisk föråldring och inte p.g.a. teknisk förslitning [17].

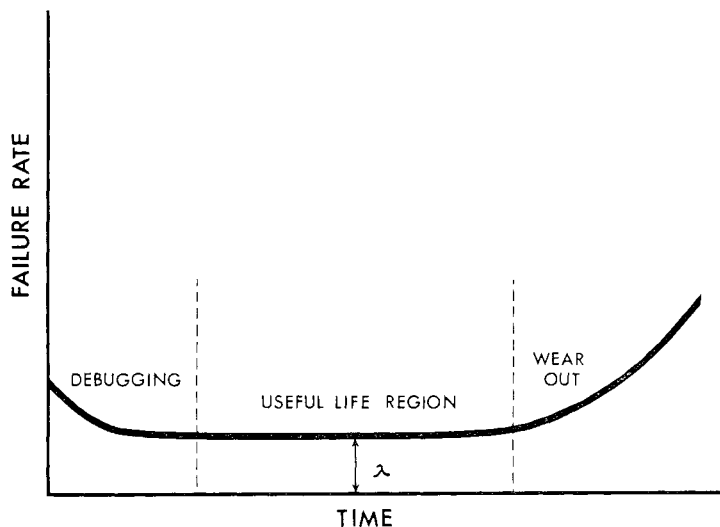
Det centrala stadiet av badkarskurvan, bästperioden, är av speciellt intresse, eftersom detta stadium i princip är avgörande för maskinens funktionssäkerhet i praktiken. Det är inom denna tidsperiod som slumpmässiga driftsavbrott (*random failures*) inträffar, och driftsavbrottsgraden (λ i figur 3) är som ovan nämnts relativt konstant. Under denna period är mean-time-between-failures (MTBF) lika med inverterade värdet av λ .

Uttrycket konstant driftsavbrottsgrad innebär inte att driftsavbrotten alltid inträffar under perioden med jämna intervaller, utan snarare att sannolikheten för att ett driftsavbrott skall inträffa under ett visst tidsintervall inom perioden är densamma som under varje annat lika långt tidsintervall under perioden. Det bör också understrykas att uttrycket slumpmässiga driftsavbrott innebär endast att tidpunkten då driftsavbrottet inträffar inte kan förutsägas, och inte att driftsavbrottsgraden inte kan påverkas. *I själva verket utgör kontrollen av de slumpmässiga driftsavbrotten en fundamental målsättning i konstruktionen av utrustning och system (maskiner) med hög funktionssäkerhet.*

Användning av MTBF är ett enkelt sätt att uttrycka maskiners funktionssäkerhet [16]. *MTBF och MTTR (mean-time-to-repair) är de två viktigaste faktorerna som påverkar maskiners tillgänglighet* (se vidare sid. 22). Vid insamling av fältdata för beräkning av maskiners MTBF är det nödvändigt att exakt definiera driftsavbrott, samt minimtiden för att ett driftsavbrott skall noteras [17, 18]. För praktiskt bruk kan MTBF definieras som

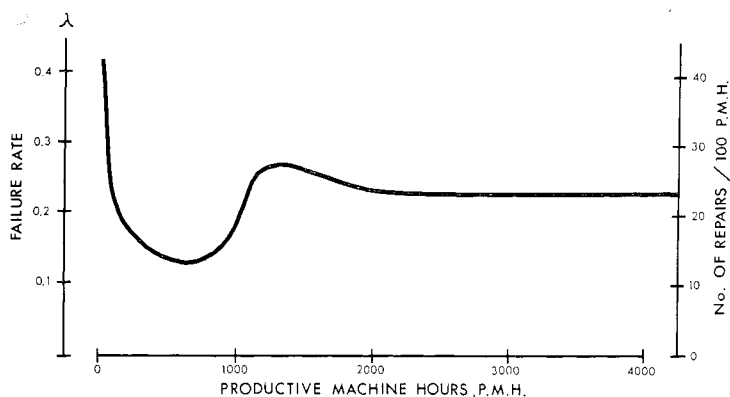
$$\text{MTBF} = \frac{\text{antalet grundtimmar}}{\text{antalet driftsavbrott}} \text{ i timmar}$$

⁵ Driftsavbrottsgrad överensstämmer med felintensitet [14].



Figur 3. "Badkars-kurvan". — Driftsafbrottsgradens (λ) normala utveckling med tiden. Driftsafbrottsgraden är praktiskt taget konstant under större delen av maskinens användningstid (livslängd). Från [30].

The "bathtub" curve.—Normal development of the failure rate over machine life. The failure rate (λ) is approximately constant during useful life. From [30].



Figur 4. Den genomsnittliga driftsafbrottsgraden (medelfelintensiteten) för 13 Koehring Harvesters under 4 000 grundtimmar. Från [17].

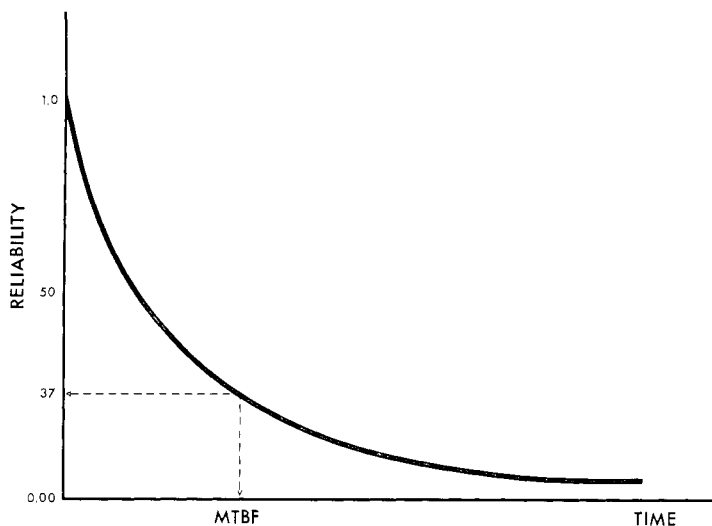
Average failure rate derived from studies of 13 Koehring Harvesters over 4000 PMH. From [17].

En grundläggande princip vid beräkningen av MTBF är att *grundtiden* används. Användning av varje annat tidsbegrepp, till exempel *utnyttjad tid*, ger icke ett adekvat resultat.

Följande exempel är hämtat från data i rapporten [16]: För 13 Koehring Harvesters

inträffade totalt 3 579 reparationer under en tidsperiod av totalt 15 265 grundtimmar. Medelvärde för Harvesters:

$$\text{MTBF} = \frac{15\,265}{3\,579} = 4,3 \text{ tim.}$$



Figur 5. Funktionssäkerheten vid exponentiell fördelning av driftsavgbrotten i tiden. Sannolikheten för "success" under en tidsperiod i timmar som är lika med MTBF (mean-time-between-failures) är 0,37. Från [12].

Reliability exponential relationship. The probability of an item surviving an operational time equal to its mean-time-between-failures (MTBF) is 0.37. From [12].

$$\lambda = \frac{3\,579}{15\,265} = 0,24$$

$$\text{MTBF} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0,24} = 4,3 \text{ tim.}$$

För samma sampel var antalet reparationer av hydraulslangar 663. Medelvärde för hydraulslangar:

$$\text{MTBF} = \frac{15\,265}{663} = 23,1 \text{ tim.}$$

$$\lambda = \frac{663}{15\,265} = 0,043$$

Från statistisk synpunkt är MTBF en parameter ur en bestämd population och representerar det konstanta tal mot vilket kvoten mellan totala antalet grundtimmar och totala antalet oberoende driftsavgbrott tenderar, när antalet grundtimmar ökar:

$$\text{MTBF} = \lim_{T \rightarrow \infty} T/r$$

där T är det totala antalet grundtimmar under vilka r driftsavgbrott observerats.

Uppskattningen av MTBF för praktiskt bruk blir alltså:

$$\text{MTBF} = \frac{T}{r}$$

Härav framgår att ju längre grundtiden är för det sampel som studerats, desto säkrare blir uppskattningen av MTBF.

En konstant driftsavgbrottsgrad utgör vanligen en acceptabel approximation av funktionssäkerhetens natur hos åtskilliga typer av system (maskiner). Om driftsavgbrottsgraden antages vara konstant, innebär detta samtidigt ett antagande att driftsavgbrotten är exponentiellt fördelade i tiden. Under den tidsperiod då driftsavgbrottsgraden är konstant, kan en maskins funktionssäkerhet beskrivas matematiskt med användning av det exponentiella förhållandet [12]:

$$R = e^{-\lambda t}$$

där

R = funktionssäkerheten (reliability)

t = specificerad tidsperiod

e = naturliga logaritmens bas (2,71828)

λ = driftsavgbrottsgraden

Förhållandet illustreras i figur 5, som också visar att sannolikheten för att en viss maskin

skall fungera utan driftsavbrott (=success) under en tidsperiod i timmar som är lika med maskinens MTBF, är 0,37 eller 37 %.

Med användande av samma data som i föregående exempel, beräknas nedan funktionssäkerheten för Koehring Harvesters i två fall, för 5 resp. 100 grundtimmar:

Fall 1

$t = 5$ grundtimmar (ungefär ett 8-timmars skift)

$\lambda = 0,24$

$$R = e^{-0,24 \times 5} = \frac{1}{2,718^{1,2}} = 0,31$$

Sannolikheten i detta fall är alltså 31 % att intet driftsavbrott kommer att inträffa under en tidsperiod av 5 grundtimmar. Om exempelvis 10 Koehring Harvesters antages insatta i drift på en avverkningstrakt, kan

man förvänta att under ett skift kommer 7 maskiner att få driftsavbrott, medan de 3 återstående maskinerna förväntas komma att fungera utan driftsavbrott.

Fall 2

$t = 100$ grundtimmar

$\lambda = 0,24$

$$R = e^{-0,24 \times 100} = \frac{1}{2,718^{24}} = \frac{1}{10,5^{10}}$$

I detta fall blir den förväntade funktions-säkerheten nära noll, vilket innebär att chanserna att köra en Koehring Harvester 100 grundtimmar utan driftsavbrott är praktiskt taget obefintliga. Noggrannheten i dessa förutsägelser är givetvis beroende av storleken och kvaliteten hos insamlade data, som använts för beräkningen av driftsavbrottsgraden [16].

6 Underhållsmässighet (maintainability)

Under senare år har tekniska åtgärder på konstruktionsstadiet (*maintainability engineering*) blivit alltmer betydelsefulla i strävan att hålla tekniskt avancerade maskiner i funktionsdugligt skick så snabbt, lätt och billigt som möjligt [3, 5, 8, 21, 27, 28, 35, 36, 38].

Utvecklingen och användningen av vetenskapliga principer för maskiners underhållsmässighet grundlades under 1960-talet av flygvapnet och armén i Förenta Staterna, och numera har forskning och tillämpning rörande dessa principer helt integrerats med utvecklingsarbetet även inom främst flyg- och elektronikindustrierna.

Vid tillämpningen på skogsbrukets maskiner kan underhållsmässighet lämpligen definieras som *den produkttegenskap som bidrar till att erforderligt underhåll¹ (reparation och skötsel) kan utföras med snabbhet, ekonomi, lätthet, noggrannhet och på ett säkert sätt*. Underhållsmässigheten är en av de två maskinparametrar som främst bidrar till en maskins tillgänglighet. Den andra är, som tidigare nämnts, funktionssäkerheten [5].

Principiellt sett är konstruktionsåtgärder för att höja funktionssäkerheten avsedda att reducera driftsavbrottsfrekvensen (antalet reparationer), medan konstruktionsåtgärder för att förbättra underhållsmässigheten är avsedda att reducera den nödvändiga tiden (och kostnaden) för att hålla maskinen i funktionsdugligt skick, dvs. reducera tiden för reparationer av inträffade driftsavbrott, och för skötsel.

När det gäller skogsbrukets tekniskt avancerade avverkningsmaskiner framgår det klart av erfarenheterna under senare år, att tillverkarna inte tillräckligt beaktat den avgörande betydelse som en höjning av underhållsmässigheten har för att reducera stilleståndstiden, och därmed kostnaderna, särskilt med tanke på de vanligen svåra yttre

förhållandena för underhåll av dessa maskiner. En ökad satsning på konstruktionsstadiet för att förbättra underhållsmässigheten torde vara den åtgärd som snabbast skulle ge resultat i form av sänkta avverkningskostnader i detta sammanhang [17]. Härvid är bl.a. insatser för enklare felsökning (*trouble shooting*), enklare utbyte av maskindelar och komponenter, enklare förebyggande underhåll,² samt förbättrad säkerhet i samband med underhåll av stor vikt.

I nedanstående uppställning redovisas tre grundläggande principer rörande underhållsmässighet: kortaste tid, minsta kvantitet och högsta säkerhet [2, 3].

Kortaste tid

- kortaste tid för att finna, isolera och åtgärda driftstörningar
- kortaste tid för att komma åt felaktiga (skadade) enheter och delar
- kortaste tid för att reparera eller byta ut felaktiga delar
- kortaste tid för att testa och bekräfta resultatet av utförda reparationer
- kortaste tid för att utföra förebyggande underhåll (skötsel)

Minsta kvantitet

- minsta antal av erforderliga lokaler och hjälpmedel
- minsta antal av erforderlig underhållspersonal
- minsta träning för att kunna genomföra erforderligt underhåll
- minsta antal verktyg och testutrustning
- minsta antal av alla andra erforderliga underhållsresurser, inklusive reservdelar

¹ Enl. tillförlitlighetsteknikens terminologi avses med begreppet *underhåll* (*maintenance*) såväl *avhjälpande underhåll* (*corrective maintenance*) som *förebyggande underhåll* (*preventive maintenance*). För enkelhetens skull används här uttrycken *reparation* och *skötsel*.

² Dvs. *regelbundet underhåll* (*scheduled maintenance*) [14].

Högsta säkerhet

- högsta säkerhet för personal som utför underhåll
- högsta säkerhet för maskiner och utrustning
- högsta säkerhet för besättning och passagerare

På grund av att begreppet underhållsmässighet används i olika tillämpningar och under skiftande förhållanden, föreligger ett flertal olika metoder för att numeriskt kvantifiera graden av underhållsmässighet hos maskiner eller system. En gemensam grundläggande princip är dock att man syftar till att uttrycka *den i maskinen genom konstruktionsåtgärder inbyggda underhållsmässigheten*. För att kunna göra detta på ett adekvat sätt är det nödvändigt att så långt möjligt säkerställa att inte yttre, operativa faktorer påverkar den avsedda kvantifieringen. Därav följer, att vid den numeriska beräkningen av underhållsmässigheten bör användas endast de två parametrarna *aktivt underhåll*³ (dvs. ej väntetid), och *funktionstid*,⁴ dvs. *grundtid*, och att inflyandet av operativa parametrar såsom antal skift per dygn, skiftlängd, väntan på reparatör eller reservdelar, samt störningstid måste elimineras. Detta inverkar givetvis på metodiken i insamlingen av fältdata [17].

Från teoretisk synpunkt ligger termen mean-time-to-repair, MTTR, närmast för att kvantifiera underhållsmässigheten: den genomsnittliga tid som erfordras för att åtgärda inträffade driftsavbrott. MTTR definieras då som medeltiden erforderlig för reparation av en maskin i drift under ideala underhållsmässiga förhållanden, dvs. full tillgång av kunniga reparatörer, erforderliga verktyg, reservdelar, instruktioner och all annan erforderlig utrustning för underhåll:

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n R t_i}{n}$$

där n är antalet driftsavbrott, och $R t_i$ är tiden för att reparera varje sampel.

För 13 Koehring Harvester, exempelvis, observerades, under en tidsperiod av 15 265 grundtimmar, totalt 3 505 reparationer, vilka

krävde en *aktiv reparationstid*⁵ av totalt 6 310 timmar. Alltså blir:

$$\text{Medel-Harvester MTTR} = \frac{6\,310}{3\,505} = 1,8 \text{ timmar} \\ (= 1 \text{ tim. och } 48 \text{ min.})$$

Detta är i och för sig en intressant uppgift, men dess värde ur praktisk synpunkt är tämligen begränsat. Den främsta invändningen är naturligtvis att tiden för nödvändig skötsel av maskinerna inte ingår i beräkningen. Tiden för skötsel uppgick under samma tidsperiod till 2 077 timmar, vilket innebär att den egentliga reparationstiden utgjorde ca 75 % och servicetiden ca 25 % av den totala stilleståndstiden orsakad av egentligt underhåll. MTTR-uppgiften blir mer värdefull om den ställs i relation till medelväntetiden vid underhåll. Den totala stilleståndstiden orsakad av väntan på reparatör och reservdelar under tidsperioden uppgick till 2 051 timmar, motsvarande en medelväntetid per reparation av 0,585 timmar (= 35 min.).

MTTR beräknad för individuella komponenter i maskinen utgör en särskilt värdefull information då det gäller att prioritera och vidtaga tekniska förbättringar av maskinen (se figur 6, där MTTR motsvaras av *Average Time per Act.-Rep., Hrs.*).

Inom det redovisade projektet har utarbetats metoder för datainsamling och analys i syfte att *kvantifiera det konstruktionsmässigt inbyggda förhållandet mellan egentlig underhållstid och funktionstid (grundtid) för en given maskin*.

Det bör emellertid påpekas att inte samtliga de faktorer som påverkar den numeriska beräkningen av underhållsmässigheten alltid i praktiken kan adekvat uttryckas i siffror. Stilleståndstiden vid egentligt underhåll påverkas sålunda av underhållspersonalens antal (vid reparationstillfället), utbildning, träning, motivation etc. Underhållstiden påverkas också av sådana faktorer som instruktionernas och testutrustningens kvalitet.

³ "Active maintenance" = egentligt underhåll, se vidare sid. 23.

⁴ Funktionstid (operating time) = "tid under vilken en enhet är i funktion" [14].

⁵ "Active repairtime" = egentlig reparationstid, se vidare sid. 23.

SIGNIFICANT COMPONENT FAILURES

	Engine Meter Hours						Average Time per Act. — Rep Hrs.	No. of Repairs/ 1000 PMH	Act. — Rep. Hrs./ 1000 PMH	% of Total Act. — Rep. Time
	0 — 1000	1000 — 2000	2000 — 3000	3000 — 4000	4000 — 5000	5000 — 6000				
1. TREE BOOM										
02. Swing Assembly	—	X	X	X	X	X	2.0	5.4	10.8	2.6
03. Swing Cylinders	—	—	—	—	X	X	2.6	2.9		
04. Booms	X	X	X	X	X	X	3.8	4.2	16.1	3.9
10. Shear Swing Ass'y	—	X	X	X	—	—	2.7	2.3	6.2	1.5
11. Shear Swing Motor	—	—	—	—	—	X	2.0	2.3	4.6	1.1
13. Hoses	X	X	X	X	X	X	1.1	15.7	17.3	4.2
02. PROCESS TOWER										
02. Stroker Tube	—	—	X	X	X	—	3.5	1.8	6.3	1.5
09. Stroker Cylinder	—	—	X	X	—	—	4.6	1.5	6.9	1.7
11. Fittings — Hoses	—	X	X	X	X	X	1.5	11.5	16.9	4.1
03. PROCESS SHEAR & KICKER										
02. Shear Arms	—	—	—	—	—	X	2.5	0.7	1.6	0.4
03. Shear Cylinders	X	X	X	X	X	X	2.8	6.7	18.6	4.5
05. MAIN FRAME										
03. Articulating Hinge	—	—	—	—	X	—	6.9	0.3	2.1	0.5
07. Transfer Rollers	—	—	—	—	—	X	1.6	2.6	4.2	1.0
07. LOG BOOM										
04. Booms	X	X	X	X	X	X	3.3	1.7	5.4	1.3
06. Grapple	X	X	—	X	X	X	2.4	3.6	8.5	2.0
08. DRIVE SYSTEM										
03. Tires	—	—	—	X	X	X	2.0	4.6	9.1	2.2
04. Wheels	—	—	—	—	—	X	2.3	1.0	2.3	0.6
05. Planetary Hub	—	X	X	X	X	X	4.9	2.5	12.0	2.9
06. Axle	—	—	—	—	X	—	5.9	0.3	1.5	0.4
07. Differential	—	—	—	—	X	X	5.5	0.5	2.8	0.7
08. Transmission	—	—	—	—	X	—	2.9	3.3	9.5	2.3
09. Sunstrand Motor	—	—	—	X	—	—	2.7	1.9	5.0	1.2
09. POWER UNIT										
01. Engine	X	—	—	X	X	—	3.4	2.0	6.8	1.7
04. Clutch	—	—	—	—	X	—	1.8	2.4	4.3	1.0
05. Pump Drive	—	X	X	X	—	—	4.6	2.3	10.6	2.5
07. Engine Electric	—	—	—	—	—	X	2.1	1.4	2.9	0.7
11. HYDRAULICS										
01. Pumps	—	X	X	—	—	X	2.4	2.1	5.0	1.2
03. Filters	X	X	—	—	—	—	2.4	2.1	5.0	1.2
04. Solenoid Valves	X	X	—	—	X	—	2.1	3.6	7.6	1.8
06. Accumulators	X	—	—	X	—	—	1.3	4.2	5.5	1.3
08. Press.Control Valves	X	X	X	X	X	X	1.8	4.6	8.3	2.0
09. Pressure Switches	—	X	X	—	—	—	1.8	6.2	11.2	2.7
13. Plumbing	X	X	X	X	X	X	1.4	8.5	11.6	2.8
12. R.P. CONTROL SYSTEM										
01. Pump	—	X	—	—	—	—	2.2	1.8	3.9	0.9
13. ELECTRICAL										
01. Switches	—	X	—	X	X	X	1.6	4.6	7.4	1.8
02. Wiring	—	—	X	X	X	—	1.8	3.0	5.4	1.3

Figur 6. Sammanställning av reparationsstatistik för maskinkomponenter. Tidsperioder under vilka reparationer av en komponent översteg 1,0 % av den totala egentliga reparationstiden är markerade med X. Från [16].

Significant component failure data. The time periods during which repairs of a component exceeded 1.0 % of the total active-repair time are marked with an X. From [16].

Med denna reservation gjord, har valts att kvantifiera det avsedda förhållandet mellan underhållstid och grundtid för en maskin med termen *Mechanical Non-Availability, MNA*.^{*} $MNA = \text{Totala antalet egentliga underhållstimmar} / 100 \text{ grundtimmar}$, eller med andra ord maskinens stillestånd i timmar p.g.a. egentligt underhåll (reparation och skötsel) under en tidsperiod då 100 grundtimmar presterats.

I det på detta sätt beräknade värdet av MNA har alltså så långt praktiskt möjligt och erforderligt inflytandet från yttre, operativa parametrar eliminerats, och storleken av termen MNA avgörs av de två maskinparametrarna funktionssäkerheten (frekvensen driftsavbrott) och underhållsmässigheten (tiden för erforderligt egentligt underhåll). Användningen av MNA möjliggör sålunda en värdering av förhållandet mellan stillestånd p.g.a. underhåll och den presterade grundtiden för en given maskin, praktiskt taget oberoende av operativa parametrar. Det förtjänar särskilt framhållas att i beräkningen av MNA används grundtiden (G_{15}), alltså den tid under vilken maskinen är i drift för avsedd produktion, och inte utnyttjad tid, dvs. grundtiden jämte avbrotts-

tiden (störningstid, skötseltid och reparationstid). Härigenom erhålls så långt det är praktiskt möjligt en objektiv värdering av maskinens konstruktionsmässigt inbyggda driftsäkerhet.

Erfarenheterna från användningen av MNA-begreppet inom det redovisade projektet visar klart, att denna värderingsmetod kan ge tillverkare och brukare av skogsmaskiner en betydelsefull, enkelt användbar och tillräckligt adekvat information, inte bara vid provning av enskilda maskiner och vid objektiv jämförelse mellan maskiner insatta under olika operativa förhållanden, utan också för kontinuerlig uppföljning av maskiner i ordinarie drift. Erfarenheterna visar också att insamlingen av erforderliga data i fält är enkel att genomföra och föga kostnadskrävande, även under längre tidsperioder [17, 18].

MNA kvantifierar maskiners maskinella tillgänglighet, och ger därvid motsvarande information som begreppet Mechanical Availability, men uttryckt i timmar i stället för procent (se kapitel 7).

^{*} Som översättning av termen MNA föreslås underhållstidfaktorn, se vidare sid. 26.

7 Tillgänglighet (availability)

Beräkningar av maskiners och systems *tillgänglighet*¹ avser i princip att numeriskt kvantifiera hur den operativa effektiviteten påverkas av stillestånd p.g.a. underhåll [3, 5, 24, 30, 38, 41]:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MDT} \text{ (vanligen i procent)}$$

där A = tillgängligheten (availability)

MTBF = mean-time-between-failures

MDT = mean-downtime (medelstillestånds-tid)

Tillgänglighetens numeriska värde bestäms sålunda av den genomsnittliga tiden mellan inträffade driftsavbrott (failures) och den genomsnittliga stilleståndstiden, orsakade av dessa driftsavbrott.

Problemet när det gäller användning av begreppet tillgänglighet i praktiken sammanhänger med skiftande definitioner och mätning av *driftsavbrott* och *stillestånd*. För att kvantifieringen skall bli adekvat, måste de ingående faktorerna analyseras och exakt definieras, exempelvis: minimitiden för notering av driftsavbrott, egentligt reparationsarbete kontra väntan på reparatör eller reservdel, reparation kontra skötsel, utnyttjad tid kontra grundtid etc.

I stället för att använda MTBF och MDT vid den numeriska beräkningen av tillgängligheten, kan man direkt använda de aktuella tiderna i timmar, vilket ger exakt samma resultat (se vidare exemplet nedan).

Enligt definitionen ovan, är tillgängligheten en funktion av frekvensen driftsavbrott och av stilleståndstiden för att åtgärda dessa driftsavbrott. Driftsavbrottseffekvensen är i normala fall huvudsakligen beroende av tillverkningsfaktorer såsom design och kvalitet (dvs. maskinparametern funktions-säkerhet). Tidsåtgången för att åtgärda driftsavbrotten är å andra sidan i praktiken beroende dels av tillverkningsfaktorer (ma-

skinparametern underhållsmässighet) och dels av de aktuella yttre förhållandena (operativa parametern underhållsorganisationens effektivitet). Ur effektivitetssynpunkt är det därjämte av intresse att studera hur den totala stilleståndstiden under viss tidsperiod (skift) påverkas av den aktuella störningstiden (*Non-Mechanical Delays*), dvs. fastkörning, väntan på virke etc. (den operativa parametern drivningsorganisationens effektivitet).

Detta gör det nödvändigt att särskilja och definiera olika typer av tillgänglighet, alltefter ändamålet med kvantifieringen i det aktuella fallet.

Följande tidsdefinitioner används (definitionerna överensstämmer i princip med Forskningsstiftelsen Skogsarbetens rekommendationer, se vidare sid. 25):

Utnyttjad tid = Grundtid arbete + Grundtid övrigt + Avbrottstid
där

Grundtid arbete = "Produktiv tid" (PMH), den tid som åtgår för arbetsuppgiftens egentliga lösande, jämte smärre uppehåll vars längd inte överstiger 15 minuter (= G_{15} arbete)

Grundtid övrigt = Den tid under vilken annat arbete utförs än vad maskinen är avsedd för, exempelvis transport mellan averkningsplatser, bärgningshjälp osv. (= G_{15} övrigt)

Grundtid = Grundtid arbete + Grundtid övrigt

Avbrottstid = Egentlig underhållstid + Under-

¹ Enligt [14], svensk standard SEN 410505, definieras tillgänglighet, A(t) — availability, som "sannolikheten för att en enhet vid godtycklig tidpunkt t inom ett givet tidintervall är i lägst viss beredskapsgrad eller visst funktionstillstånd vid givna drift-, miljö- och underhållsförhållanden".

hållsväntetid + Störningstid

där

Egentlig underhållstid = Egentlig reparationstid + Skötseltid^a

Underhållsväntetid = Väntan på reparatör och/eller reservdel

Störningstid = Stilleståndstid orsakad av annan anledning än underhåll (ex. uppvärmning, väntan på virke, instruktioner, fastkörning osv.)

Egentlig reparationstid = Tid för utförande av egentligt (= aktivt) reparationsarbete

Skötseltid = Tid för utförande av skötselarbete.

(För utförliga definitioner, se [17, 18])

TVå olika slag av tillgänglighetsbegrepp redovisas här:^a

1. Mechanical Availability [5, 16, 17]

$$A_1 = \frac{\text{grundtid}}{\text{grundtid} + \text{egentlig underhållstid}} \quad \text{eller}$$

$$A_1 = \frac{MTBM_1}{MTBM_1 + \bar{M}}$$

där

$MTBM_1$ = (mean-time-between-measures) = medeltiden (i grundtimmar) mellan stillestånd orsakade av egentligt underhåll

\bar{M} = (mean-active-maintenance-time) = medelvärde av stilleståndstider orsakade av egentligt underhåll

Mechanical Availability motsvaras på svenska närmast av *driftsäkerhet* (se dock sid. 25) och belyser en maskins tillgänglighet i praktisk drift i princip beroende av dess funktionssäkerhet och underhållsmässighet, utan direkt påverkan av operativa parametrar. Detta värde ger samma information som *Mechanical Non-Availability, MNA*, (sid. 21) uttryckt i procent i stället för timmar.

Exempel: Data för 13 Koehring Harvesters [16]

Grundtid = 15 265 tim.

Egentlig reparationstid = 6 310 tim.

Skötseltid = 2 077 tim.

Antal reparationstillfällen = 3 505

Antal skötselstillfällen = 2 806

Då blir

$$\begin{array}{r} \text{Egentlig underhållstid} = 6\,310 \\ 2\,077 \\ \hline 8\,387 \text{ tim.} \end{array}$$

$$\text{och } A_1 = \frac{15\,265}{15\,265 + 8\,387} = 64\%$$

eller:

$$MTBM_1 = \frac{15\,265}{3\,505 + 2\,806} = 2,4 \text{ tim.}$$

$$\text{och } \bar{M} = \frac{6\,310 + 2\,077}{3\,505 + 2\,806} = 1,3 \text{ tim.}$$

$$\text{varvid } A_1 = \frac{2,4}{2,4 + 1,3} = 64\%$$

2. Utilization [16, 17, 24]

$$A_2 = \frac{\text{grundtid}}{\text{utnyttjad tid}} \quad \text{eller}$$

$$A_2 = \frac{MTBM_2}{MTBM_2 + MDT}$$

där

$MTBM_2$ = medeltiden (i grundtimmar) mellan samtliga stillestånd

MDT = (mean-downtime) = medelvärde av samtliga stilleståndstider (dvs. orsakade av Egentlig underhållstid, Underhållsväntetid och Störningstid)

Utilization överensstämmer med begreppet *Teknisk utnyttjandegrad* (Forskningsstiftelsen Skogsarbeten), och belyser en maskins tillgänglighet i praktisk drift beroende dels av dess funktionssäkerhet och underhållsmässighet, och dels av operativa parametrar

^a Beträffande skötseltid har i projektet inte skilts på aktivt arbete och väntetid (i motsats till för reparationsarbetet) eftersom erfarenheten visade att detta inte var nödvändigt ur noggrannhetssynpunkt, då vanligen ingen logistisk väntetid föreligger vid skötsel (arbetet utförs av föraren).

^a Betr. definition av övriga tillgänglighetsbegrepp, se [17].

(underhållsorganisationens och drivningsorganisationens effektivitet).

Vid beräkningen av Utilization enligt CPPA Standard Definitions, [24], används

Scheduled Machine Hours, SMH, för utnyttjad tid. I regel medför detta ingen skillnad mot här redovisad metod, men ibland kan smärre differenser uppkomma.

8 Driftsäkerhet

Vid tiden för projektets genomförande 1970—72 fanns det inte någon fastställd nomenklatur i Sverige betr. skogsmaskinens driftsäkerhet och tillförlitlighet.¹ Några definitioner av s.k. utnyttjandegrader är dock redovisade i Forskningsstiftelsen Skogsarbetens handledning: "Tidsbegrepp för maskinarbeten", av år 1969 [4]. När denna sammanfattning skrivs (våren 1974) föreligger emellertid Skogsarbetens mera utförliga rekommendationer för definition och benämning av vissa tidsbegrepp.² Rekommendationerna överensstämmer i allt väsentligt med de i projektet utarbetade definitionerna för mätning och analys av tillförlitlighetsparametrar.³ Med hänsyn till dessa och till de av Skogsarbeten använda tidsbegreppen, redovisas i samband med följande diskussion ett förslag till svenska benämningar av de viktigare parametrarna [1, 4, 6, 11, 14, 23, 24, 40].

Som påpekats tidigare, är det i en analys som syftar till optimering av tekniskt avancerade avverkningsmaskinens användning, nödvändigt att särskilja stilleståndstidens beroende av dels maskinparametrar och dels av operativa parametrar. Den utarbetade analysmetoden bygger på dessa två principer. Dels definieras begrepp och kvantifieringsmetoder av maskinparametrar för studium av maskinens konstruktions- och tillverkningsmässiga kvalitet, samt för objektiv jämförelse mellan maskiner i detta avseende, och dels för studium av hur drivningsoperationens effektivitet påverkas av såväl maskinparametrar som operativa parametrar (underhålls- och drivningsorganisation), i syfte att optimera samspelet mellan maskinen och de yttre, genom organisationsåtgärder påverkbara förhållandena. I det förra fallet, maskinparametrarna, grundas definitionerna på det tidigare (sid. 21) diskuterade förhållandet mellan maskinens grundtid och

den egentliga underhållstiden. I det senare fallet, de operativa parametrarna, ställs de olika tidsbegreppen i relation till den tidsperiod som man planerat (men sällan helt lyckas) att utnyttja för produktion med maskinen, dvs. utnyttjad tid.

1. Maskinparametrar

$$1.1. \text{Maskinell tillgänglighet} = \frac{\text{grundtid}}{\text{grundtid} + \text{egentlig underhållstid}} \times 100$$

(överensstämmer med *Mechanical Availability*)

¹ Betr. tillförlitlighetsteknik, se fotnoten på sid. 9.

² Tord Lindberg: "Förslag till utökning av tidsbegrepp för maskinarbeten och nomenklatur för bedömningar av driftsäkerhet m.m.". Skogsarbetens stencil 1972-12-11.

M. Färg, B. Hägglund, T. Lindberg: "Studier av kostnader och driftsäkerhet för skogsmaskiner". Skogsarbetens stencil 1973-11-07.

Staffan Berg: "Jämförelse mellan svenska och kanadensiska tidsbegrepp för maskinarbeten". Utkast till Skogsarbetens Ekonomiserie, 1974.

³ I rekommendationerna definieras begreppet "driftsäkerhet" som en funktion av maskinparametrar (funktionssäkerhet och underhållsmässighet) och av operativa parametrar (underhållsväntetid). Som ett mått på driftsäkerheten används "operativ tillgänglighet",

$$OT = \frac{\text{grundtid}}{\text{grundtid} + \text{eg. underhållstid} + \text{underhållsväntetid}}$$

OT överensstämmer närmast, men icke helt, med CPPA:s

$$\text{Operational Availability} = \frac{\text{SMH-Mechanical delay}}{\text{SMH}} \quad (\text{se vidare [17]}).$$

Dessa begrepp används inte i den fortsatta diskussionen, eftersom definitionerna orsakar förvirring och framförallt eftersom begreppen inte är nödvändiga för den här avsedda analysen.

$$1.2. (Egentlig) \text{ underhållstidfaktor} = \frac{\text{egentlig underhållstid}}{\text{grundtid}} \times 100$$

eller = Antalet egentliga underhållstimmar/100 grundtimmar
(överensstämmer med *Mechanical Non-Availability, MNA*)

$$1.2.1. \text{ Egentlig reparationstidfaktor} = \frac{\text{egentlig reparationstid}}{\text{grundtid}} \times 100$$

$$1.2.2. \text{ Skötseltidfaktor} = \frac{\text{skötseltid}}{\text{grundtid}} \times 100$$

2. Maskin- och operativa parametrar

$$2.1. \text{ Teknisk utnyttjandegrad}^* = \frac{\text{grundtid}}{\text{utnyttjad tid}} \times 100$$

(överensstämmer med Utilization och med Forskningsstiftelsen Skogsarbetens definition av *Teknisk utnyttjandegrad*)

$$2.2. \text{ Total avbrottsgrad} = \frac{\text{avbrottstid}}{\text{utnyttjad tid}} \times 100$$

(överensstämmer med Skogsarbetens definition av *Avbrottsgrad*)

$$2.2.1. \text{ Maskinell avbrottsgrad} = \frac{\text{egentlig underhållstid}}{\text{utnyttjad tid}} \times 100$$

$$2.2.2. \text{ Operativ avbrottsgrad} = \frac{\text{underhållsväntetid} + \text{störningstid}}{\text{utnyttjad tid}} \times 100$$

$$2.2.2.1. \text{ Underhållsväntegrad} = \frac{\text{underhållsväntetid}}{\text{utnyttjad tid}} \times 100$$

$$2.2.2.2. \text{ Störningsgrad} = \frac{\text{störningstid}}{\text{utnyttjad tid}} \times 100$$

De redovisade parametrarnas natur, inbördes samband och praktiska användning belyses kanske enklast genom ett numeriskt exempel. För en given maskin har under en viss tidsperiod följande fältdata insamlats:

Grundtid	600 tim.
Avbrottstid	400 tim.
Störningstid	100 tim.
Underhållsväntetid	140 tim.
Egentlig underhållstid	160 tim.
	400 tim.
Egentlig reparationstid	120 tim.
Skötseltid	40 tim.
	160 tim.
Utnyttjad tid	1 000 tim.

Då blir:

$$\text{Teknisk utnyttjandegrad} = \frac{600}{1\,000} = 60\%$$

$$\text{Total avbrottsgrad} = \frac{400}{1\,000} = 40\%$$

$$\text{av vilken Maskinell avbrottsgrad} = \frac{160}{1\,000} = 16\%$$

$$\text{och Operativ avbrottsgrad} = \frac{140 + 100}{1\,000} = 24\%$$

$$\text{av vilken Underhållsväntegrad} = \frac{140}{1\,000} = 14\%$$

$$\text{och Störningsgrad} = \frac{100}{1\,000} = 10\%$$

$$\text{Maskinell tillgänglighet} = \frac{600}{600 + 160} = 79\%$$

$$\text{Underhållstidfaktor} = \frac{160}{600} = 27\%$$

eller = 26,7 egentliga underhållstimmar/100 grundtimmar

av vilken

$$\text{Egentlig reparationstidfaktor} = \frac{120}{600} = 20\%$$

$$\text{och Skötseltidfaktor} = \frac{40}{600} = 7\%$$

Exemplet visar att maskinen i fråga kunnat utnyttjas för avsedd produktion till 60 % av planerad tid (utnyttjad tid). Resterande 40 % beror på dels maskinella och dels operativa avbrott. Problemet som diskuteras i det följande gäller alltså att reducera avbrottstiden genom tekniska och operativa åtgärder.

* Benämningen *Teknisk utnyttjandegrad* är inte helt logisk, men den är relativt accepterad och vedertagen och används därför här. Termen *Scheduling Intensity* (= $\frac{\text{SMH}}{\text{kalendertid}} \times 100$, eller $\frac{\text{utnyttjad tid}}{\text{kalendertid}} \times 100$) överensstämmer med Skogsarbetens definition av "Utnyttjandegrad". Den engelska benämningen är mer logisk och den direkta översättningen "skiftintensitet" vore därför kanske bättre att använda.

Det skulle hypotetiskt kunna resoneras så att om störningstiden (100 tim.) helt kunde elimineras genom förbättring av drivningsorganisationen, och dessutom underhållsväntetiden (140 tim.) kunde helt elimineras genom förbättring av underhållsorganisationen, skulle resultatet kunna bli en motsvarande ökning av grundtiden med 240 tim., eller en ökning av den tekniska utnyttjandegraden från 60 till 84 % $\left(\frac{600 + 240}{1\,000} \right)$.

Detta hypotetiska resonemang överensstämmer emellertid inte med verkliga förhållanden och anförs endast för att fortsättningsvis belysa hur maskinparametrarna kan användas i analysen. (I exemplet var den maskinella tillgängligheten 79 % och underhållstidfaktorn 26,7 egentliga underhållstimmar/100 grundtimmar.)

De i projektet genomförda analyserna har visat att en ökning av grundtiden i princip medför en viss motsvarande ökning av erforderligt reparations- och skötselarbete, kvantifierad av underhållstidfaktorn. Detta gäller givetvis i praktiken inte för kortare tidsperioder (skift), men väl för längre tidsperioder, av storleksordningen minst 1 000 grundtimmar (se vidare nedan).

Denna ökning av stilleståndstiden, som följer av ett ökat antal grundtimmar, kan beräknas genom användning av följande samband:⁵

$$\Delta U = \frac{d(G + T) - U}{1 + d}$$

där U = den ursprungliga egentliga underhållstiden, tim.

ΔU = den egentliga underhållstidens ökning, tim.

G = den ursprungliga grundtiden, tim.

T = grundtidens och den egentliga underhållstidens sammanlagda ökning, tim.

d = underhållstidfaktorn

Den i exemplet diskuterade reduceringen av avbrottstiden med sammanlagt 240 tim. genom operativa åtgärder kan då beräknas⁶ att i praktiken komma att motsvaras av en ökning av grundtiden med ca 190 tim. och av den erforderliga egentliga underhållstiden

med ca 50 tim. Den uppnådda grundtiden blir då 600 + 190 = 790 tim. och den egentliga underhållstiden 160 + 50 = 210 tim. Detta motsvarar en teknisk utnyttjandegrad av 79 %, vilken siffra överensstämmer med den i exemplet angivna maskinella tillgängligheten på 79 %.

Det framgår alltså att vid maximalt operativt utnyttjande av maskinen (dvs. inte någon störningstid eller underhållsväntetid) överensstämmer den tekniska utnyttjandegradens numeriska värde med den maskinella tillgänglighetens numeriska värde. Den maskinella tillgängligheten anger med andra ord i princip det maximala utnyttjande av maskinen som kan åstadkommas genom förbättring av de diskuterade operativa parametrarna.

Detta innebär att en eftersträvad ytterligare höjning av den tekniska utnyttjandegraden (alltså utöver vad den maskinella tillgängligheten anger) endast kan åstadkommas genom tekniska förbättringar av maskinen, dvs. av maskinparametrarna funktionssäkerhet och underhållsmässighet.

Det genom analys av fältdata från *Repair Statistics Program* härledda sambandet mellan grundtid och egentlig underhållstid, kvantifierat genom MNA, här betecknad underhållstidfaktorn, gäller endast under två förutsättningar: För det första att underhållstidfaktorn beräknats från fältdata som insamlats under en tillräckligt lång tidsperiod, minst ca 1 000 grundtimmar och enligt en pålitlig, noggrant specificerad metodik [17, 18]. Den andra förutsättningen är att utnyttjade fältdata insamlats under en tidsperiod med praktiskt taget konstant drifts-avbrottsgrad (failure rate), och att den drivningsoperation som avses att analyseras med

⁵ Härlett ur sambanden

$$\Delta G + \Delta U = T$$

$$\text{och } \frac{U + \Delta U}{G + \Delta G} = d$$

där ΔG = grundtidens ökning, tim.

$$\Delta U = \frac{0,267(600 + 240) - 160}{1 + 0,267} = 50 \text{ tim.}$$

$$\Delta G = 240 - 50 = 190 \text{ tim.}$$

hjälp av underhållstidfaktorn ävenledes ligger inom denna tidsperiod.

Som redovisats tidigare (sid. 14) är drifts-
avbrottsgraden praktiskt taget konstant under större delen av en avverkningsmaskins livslängd (bästperioden), dvs. med undantag av inkörningsperioden i början (begynnelseperioden) och eventuellt vid slutet av maskinens livslängd (slutperioden).

Eftersom underhållstidfaktorn i princip är beroende av maskinens funktionssäkerhet (drifts-
avbrottsgraden eller MTBF) och av dess underhållsmässighet (MTTR och skötsel), följer att underhållstidfaktorn och därmed den maskinella tillgängligheten kommer att hålla sig relativt konstant under den tidsperiod då drifts-
avbrottsgraden är konstant (p.g.a. att maskinens MTTR vanligen är relativt oförändrad om tidsperioden är tillräckligt lång).

Underhållstidfaktorn skulle därför kunna illustreras med en kurva av i princip samma utseende som den s.k. badkarskurvan i figur 3, eller som den mot badkarskurvan svarande kurvan för drifts-
avbrottsgraden i figur 4, och den maskinella tillgängligheten med en spegelvänd sådan kurva. Den tekniska utnyttjandegraden, däremot, uppvisar som man kan förvänta stora variationer under samma tidsperiod, beroende på att dess värde påverkas av den operativa avbrotts-
gradens variationer.⁷

Kurvan i figur 4 bygger på fältdata från

13 Koehring Harvesters under tiden 0—4 000 grundtimmar. Den påbörjade data-
insamlingen har fortsatt under 1973 och 1974 och resultat föreligger våren 1974 för ett tjugotal Koehring Harvesters fram till ca 10 000 grundtimmar (PPRIC Biweekly reports 1—70, och J. H. Boyd: Reducing Downtime on Harvester Operations, CPPA 54th Annual Meeting of the Woodlands Section, Draft reprint service). Av resultaten framgår bl.a. att för de studerade maskinerna nådde den maskinella tillgängligheten sin lägsta nivå vid 1 000—1 500 grundtimmar (bortsett från inkörningsperioden), för att därefter stiga och i fortsättningen fram till 10 000 grundtimmar ligga på en relativt konstant nivå. Om denna trend fortsätter, vilket resultaten antyder, innebär det att vår nuvarande bedömning av dessa maskiners tekniska livslängd bör omprövas, dvs. livslängden har vanligen hittills underskattats (se sid. 14).

⁷ I praktiken förbättras ofta den tekniska utnyttjandegraden under bästperioden. Detta beror främst på reduktion av underhållsväntetid och störningstid, men också på icke helt kvantifierbara faktorer såsom underhållspersonalens ökade skicklighet (kortare tid för felsökning etc., se vidare sid. 19). Dessutom kan givetvis genomförande av tekniska förbättringar av maskinkomponenter under bästperioden bidra till en höjning av såväl den maskinella tillgängligheten (= lägre underhållstidfaktor) som den tekniska utnyttjandegraden.

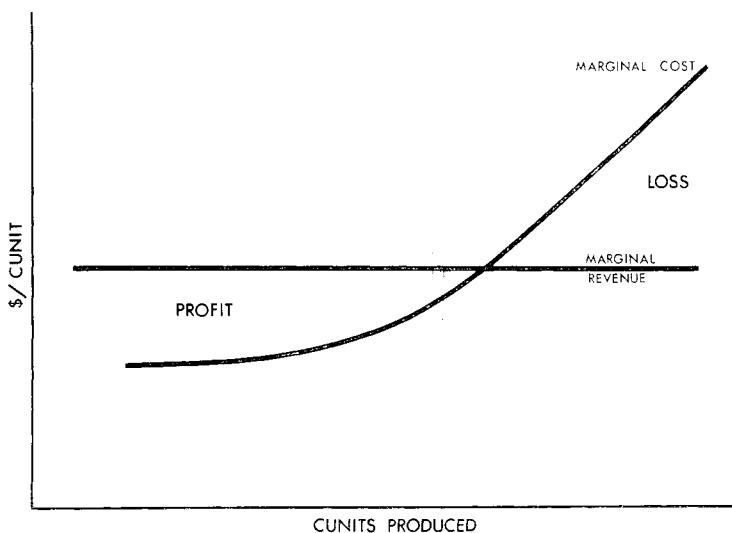
9 Optimeringsanalyser

Optimering av en avverkningsmaskins användning i praktisk drift kan göras genom beräkningar av kostnaden, eller snarare den minskade intäkt, som beror på förlorad produktion under maskinens stillestånd till följd av erforderligt underhåll eller operativ ineffektivitet. Dessa beräkningar kräver tillgång till data, insamlade enligt en väl specificerad metodik, beträffande främst underhållskostnader, reparationer och produktion [16, 17, 18]. Data från dessa rapporter redovisas i samband med följande diskussion beträffande principer för optimering av avverkningsmaskinens användning genom utnyttjande av information från fältstudier [9, 31, 42, 43, 46, 47, 48].

Den principiella kostnadskurvan för maskinstillestånd illustreras i figur 7. Maskinens optimala produktion (dvs. den produk-

tion som ger den lägsta kostnaden per m^3) bestäms av skärningspunkten mellan *gränskostnadskurvan* (*MC*, *Marginal Cost*) och *gränsintäktskurvan* (*MR*, *Marginal Revenue*). Om produktionen av någon anledning är lägre än optimumpunkten, kan lönsamheten (profit) ökas genom en ökning av produktionen. Bortanför optimumpunkten medför emellertid en fortsatt ökning av produktionen att lönsamheten övergår i förlust (loss), eftersom $MC > MR$.

Gränsintäkten för en avverkningsmaskin utgörs i princip av försäljningsvärdet av det producerade virket, exempelvis 8-fots rundvirke vid bilväg för en Koehring Harvester. Försäljningsvärdet är vanligen oberoende av mängden virke som producerats, dvs. gränsintäktskurvan, *MR*, är en rät, horisontell linje, som i figuren. Det förekommer emel-



Figur 7. Förhållandet mellan gränskostnaden (*MC*) och gränsintäkten (*MR*) för en avverkningsmaskin vid stigande produktion. Från [17].

Relationship between the marginal cost and the marginal revenue of a logging machine, with increasing production. From [17].

lertid ofta att det producerade virket inte försäljs, varvid virket representerar en kostnad i stället för en intäkt. I sådana fall kan man vid beräkningar av stilleståndskostnaden betrakta den totala medelkostnaden per m³ producerat virke som lika med gränsintäkten, dvs. kurvan för medelkostnaden sammanfaller med gränsintäktskurvan, MR, i figur 7.

Den gränskostnad, som orsakas av åtgärder för att reducera stilleståndstiden och därmed öka antalet grundtimmar/utnyttjad tid (dvs. ökad teknisk utnyttjandegrad), kan indelas i två grupper, direkta och indirekta gränskostnader. De direkta gränskostnaderna utgörs av de rörliga maskinkostnaderna (exempelvis bränsle), medan de indirekta gränskostnaderna utgörs av de extra kostnadsutlägg som gör det möjligt att reducera stilleståndstiden (exempelvis insättande av ytterligare en reparatör). Den direkta gränskostnadskurvan är vanligen en rät, horisontell linje, i motsats till den indirekta gränskostnadskurvan, som stiger snabbt med ökad produktion. Vid summering av dessa två kurvor erhålls gränskostnadskurvan, som är illustrerad i figur 7. Det framgår av figuren att lönsamhetens ökning blir mindre och mindre när produktionen stiger mot optimumpunkten.

Kalkylexempel

Data insamlade från 11 Kochring Harvesters under en tid av ett år används [16]. Den genomsnittliga tekniska utnyttjandegraden¹ var 57 %. De redovisade underhållskostnaderna och förarkostnaden är de aktuella, verkliga kostnaderna, medan kapitalkostnaden beräknats. En omräkning har gjorts av den nordamerikanska volymenheten cunit² till m³f och av kanadensisk dollar till svenska kronor.

En genomsnittlig maskinkostnad av 166,25: —/grundtimme vid medelprestationen 7,0 m³f/grundtimme motsvarar en medelkostnad av 23,75: —/m³f. Vid kalkylering av stilleståndskostnaden kan då i detta fall gränsintäkten betraktas som 23,75: —/m³f.

Den direkta gränskostnaden för produk-

	Medel- kostnad kr/grund- timme	Spridning kr/grund- timme
Kostnader		
Underhållspersonal (reparatörer), utrustn.	34,70	24,20 — 47,95
Reservdelar	27,50	11,65 — 42,00
Däck	6,20	0 — 14,95
Bränsle, smörjolja, hydraulolja ³	13,80	9,75 — 18,05
Summa		
Underhållskostnad ⁴	82,20	52,00 — 119,70
Kapitalkostnad ⁴	57,95	
Förarkostnad	26,10	
Total Maskinkostnad, kr/grundtimme	166,25	

Produktivitet

(8-fots virke vid bilväg, köravstånd 1 000—2 000 meter)

Prestation	Genom- snitt	Spridning
m ³ f/grundtimme	6,5	5,4 — 7,6
träd/grundtimme	39	33 — 56
Trädvolym		
f ³ /träd	5,9	4,1 — 8,3
m ³ f/träd	0,17	0,12 — 0,24

tion med maskinen under en extra timme (i stället för stillestånd) utgörs i princip endast av underhållskostnaden.⁵ Visserligen minskar den genomsnittliga kapital- och förarkostnaden per grundtimme därvid, eftersom antalet grundtimmar ökar, men denna kostnadsminskning är så obetydlig att den kan negligeras av praktiska skäl. Av den totala underhållskostnaden påverkas vanligen inte kostnaden för underhållspersonal och utrustning av en relativt liten ökning av den tekniska utnyttjandegraden. Den direkta gränskostnaden blir då:

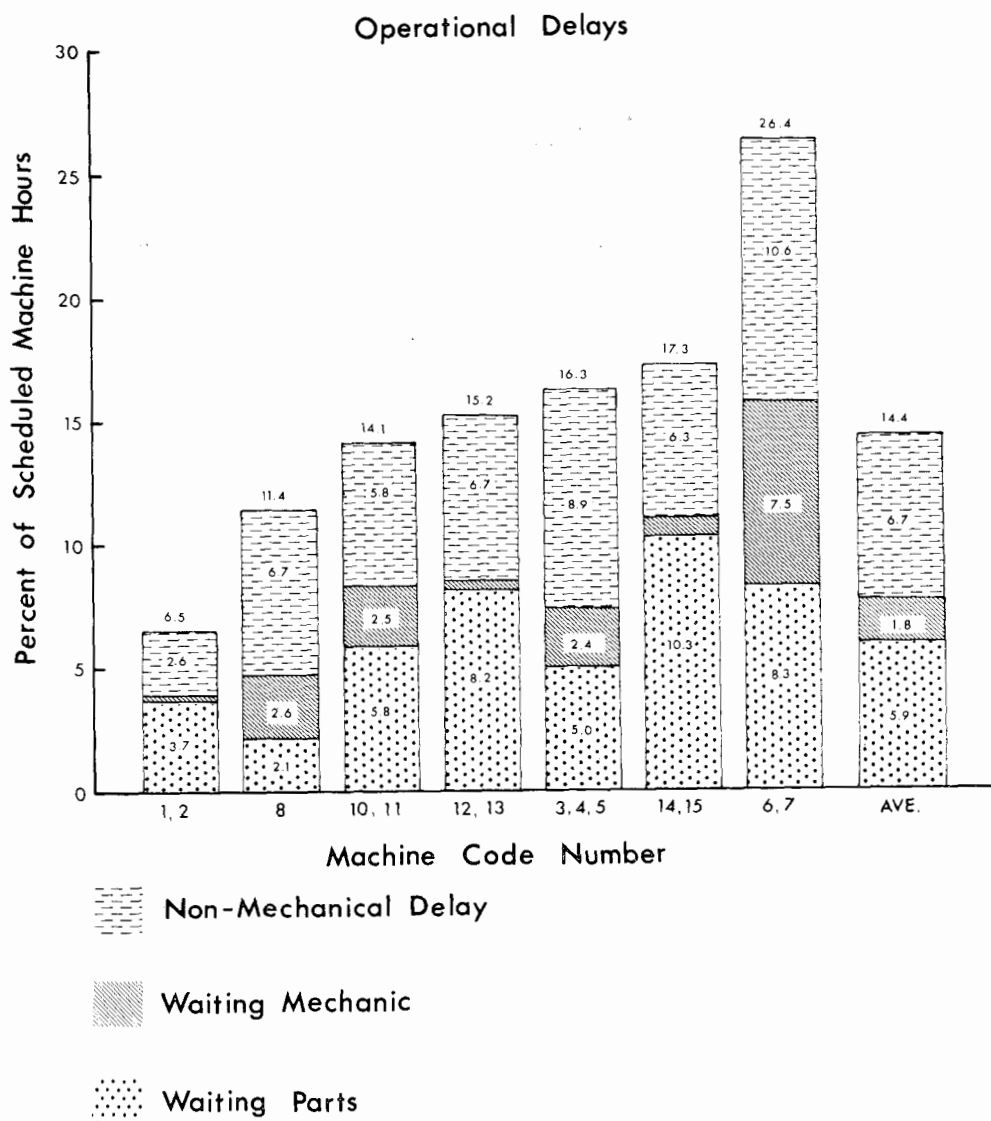
$$^1 \text{ Egentligen } Utilization: \frac{PMH}{SMH} \times 100.$$

² Cunit = 100 f³ = 2,83 m³f. CS = 4,75 sv. kr.

³ Vid en bedömning av underhållskostnadens storlek bör det observeras att kostnaden för driv- och smörjmedel ingår.

⁴ Beräknad vid 14 000 grundtimmars total användning (se vidare [16]).

⁵ Det förutsätts att föraren är tidavlönad och att hans ersättning utgår även under stillestånd.



Figur 8. Den operativa avbrottsgraden för sju studerade drivningstrakter med Koehring Harvesters. Från [16].

Operational Delays per logging operation-unit. From [16].

	Kr/grundtimme
Reservdelar	27,50
Däck	6,20
Bränsle, smörjolja, hydraulolja	13,80
Summa	47,50: —/grundtimme
Direkt gränskostnad eller	6,80: —/m ³ f

Vid en gränsintäkt av 23,75: —/m³f och en direkt gränskostnad av 6,80: —/m³f blir den genomsnittliga stilleståndskostnaden

16,95: —/m³f, vilket motsvarar en genomsnittlig stilleståndskostnad av ca 120: —/grundtimme (C\$ 25.00/PMH).

Den eventuella lönsamheten vid genomförandet av olika åtgärder som ökar den tekniska utnyttjandegraden kan studeras genom att den indirekta gränskostnaden för sådana åtgärder ställs i relation till den kända stilleståndskostnaden, 120: —/grundtimme.

För de 11 studerade Koehring Harvesters

var den genomsnittliga operativa avbrottsgraden⁶ under ett år 14,4 % (figur 8). De kördes i medeltal under året ca 220 dagar i två 8-timmars skift, motsvarande 440 skift per år. Den operativa avbrottsgraden 14,4 % motsvarar en stilleståndstid per skift av drygt en timme (69 min.). Den genomsnittliga stilleståndskostnaden per maskin under ett år kan då beräknas till⁷

Stilleståndskostnad = ca 50 000: —/maskin och år.

Vid en teknisk utnyttjandegrad av 60 % medför en timmes ökning av grundtiden per skift att den tekniska utnyttjandegraden stiger med ca 10 %, till 70 % (med hänsyn tagen till ökningen av underhållstiden). Med en stilleståndskostnad på 50 000: — per år vid en timmes stillestånd/skift som i exemplet ovan, kommer alltså en ökning av den tekniska utnyttjandegraden med en procentenhet att motsvara en sänkt stilleståndskostnad av ca 5 000: —/maskin och år.

Antag att den operativa avbrottsgraden kan reduceras till hälften, dvs. en halv timmes operativ väntetid per skift i stället för en timme, genom förbättring av underhållsorganisationens och drivningsorganisationens effektivitet. (Det framgår av figur 8 att den operativa avbrottsgraden på de 7 studerade drivningsoperationerna varierade från 6,5 till 26,4 %.) Stilleståndskostnaden under ett år skulle därmed kunna minskas från 50 000: — till 25 000: —. Härav framgår att en åtgärd (= indirekt gränskostnad) som minskar den operativa väntetiden med en halv timme per skift, exempelvis installation av kommunikationsradio, skulle vara lönsam upp till en kostnad av ca 25 000: —/år och maskin.

Beräkningar av lönsamheten av tekniska åtgärder som förbättrar maskinens funktionssäkerhet och underhållsmässighet kan utföras på liknande sätt med användning av den kända stilleståndskostnaden. Det förutsätts att de tekniska förbättringarna inte är så omfattande att de resulterar i en möjlig reduktion av erforderlig underhållspersonal och utrustning; i så fall blir lönsamheten ännu större än i följande exempel.

Den genomsnittliga stilleståndstiden för de studerade Koehring Harvesters till följd

av egentligt reparationsarbete med hydraulcylindrar⁸ uppgick till 15,1 % av maskinens totala egentliga reparationstid, eller 64,2 tim./1 000 grundtimmar (se fig. 9). Detta motsvarar en genomsnittlig stilleståndstid av ca 17 minuter per skift⁹ och en stillestånds-

kostnad av $\frac{50\,000}{60} \times 17 = 14\,200$: —/maskin

och år, eller ca 80 000: — under maskinens beräknade livslängd (14 000 grundtimmar). Den indirekta gränskostnaden i detta fall utgörs av en ökning av tillverkningskostnaden (och ev. av inköpspris) i syfte att förbättra hydraulcylindrarnas funktionssäkerhet (= öka MTBF) och underhållsmässighet (= minska MTTR). Så skulle exempelvis tekniska åtgärder som under maskinens livslängd sänker den erforderliga egentliga reparationstiden av hydraulcylindrar med hälften, från 17 till 8 minuter per skift, vara lönsamma upp till en kostnad av ca 40 000: — per maskin.

De redovisade exemplen avser att belysa hur tillgång till en begränsad men väl definierad mängd fältdata kan användas för att studera maskin- och operativa parametrars inflytande på stilleståndstiden, i syfte att prioritera genomförandet av de tekniska och operativa åtgärder som bäst bidrar till det sökta, optimala utnyttjandet av maskinen i praktiken.

Under förutsättning att insamlingen av fältdata planeras omsorgsfullt med målet i sikte och utförs på ett adekvat sätt, kan de i projektet utarbetade analysmetoderna ge ett objektivt underlag för genomförandet av effektivitetshöjande åtgärder, för såväl maskinkonstruktörer och tillverkare, som för brukare av maskinerna.

Efter hand som mer information blir tillgänglig kan metoderna för analys och opti-

⁶ Operativ avbrottsgrad = $\frac{\text{underhållsväntetid} + \text{störningstid}}{\text{utnyttjad tid}} \times 100$.

⁷ 120: —/tim. och skift $\times 440$ skift/år = 52 800: —/maskin och år. Detta motsvarar under ett år ca 15 % förhöjd avverkningskostnad/m³f (3,50: —/m³f av 23,75: —/m³f).

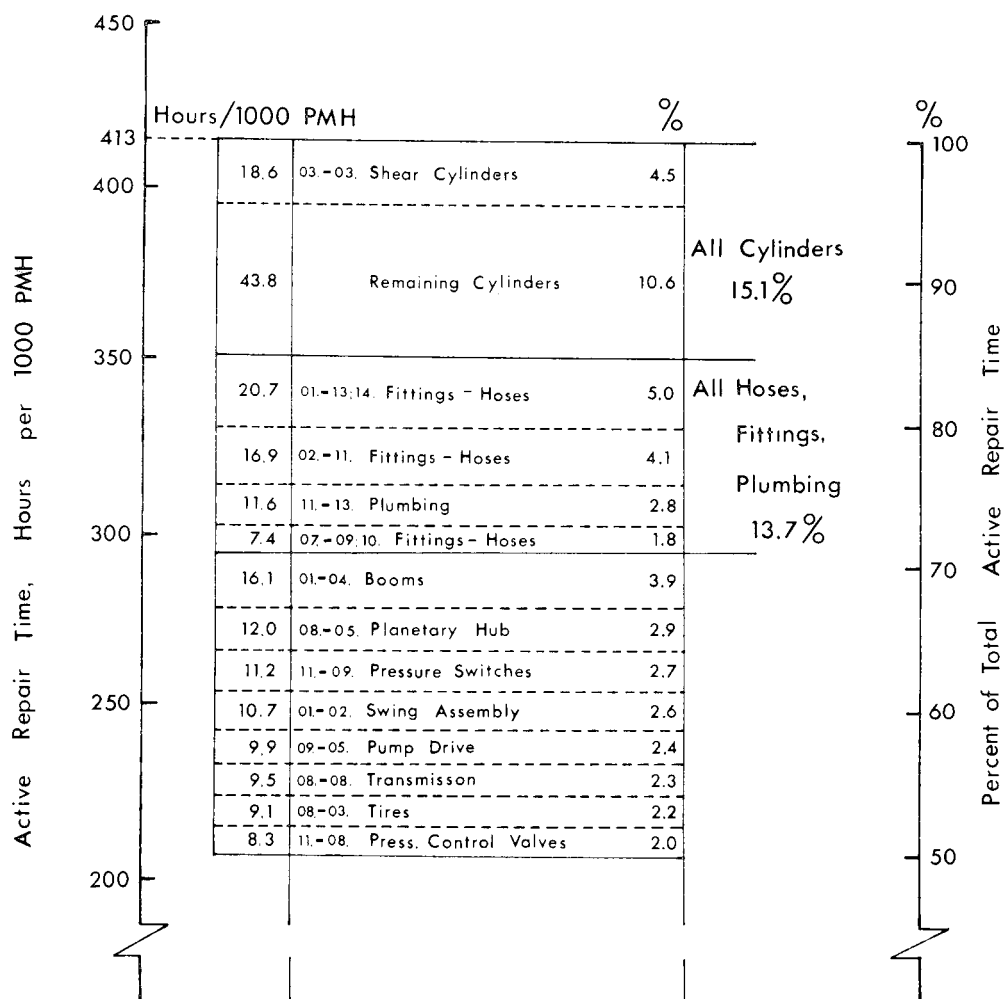
⁸ Hydraulcylindrars MTBF = 90 tim. och MTTR = 3,0 tim. (från fig. 6).

⁹ Vid den tekniska utnyttjandegraden 57 %.

Repair Highlights

Component Repair Times

Average of 13 Harvesters



Figur 9. Genomsnittlig egentlig reparationstid för maskinkomponenter. Från [16].

Average active-repair time of components. From [16].

mering ytterligare förfinas. Som tidigare nämnts, fortsätter insamlingen av fältdata från Koehring Harvesters vid Pulp and Paper Research Institute of Canada, enligt de utarbetade principerna, och är planerad att fortgå under maskinernas livslängd. I

samband därmed har sedan projektet startades 1971 till i mars 1974 fortlöpande distribuerats ett 70-tal Bi-weekly Reports till brukare och tillverkare av maskinen, med resultatssammanställningar från rutinmässig analys via dator.

Sammanfattning

Större delen av kostnaderna för virkesråvaran utgörs av avverkningskostnader. För att begränsa dessa kostnader har under de senaste åren försöken att fullständigt mekanisera avverkningsarbetet intensifierats, och maskiner har utvecklats, främst i Nordamerika och Sverige, för fällning, kvistning och kapning. Införandet av dessa tekniskt avancerade och komplexa avverkningsmaskiner, av typen processorer och skördare, har emellertid hittills mera sällan medfört att avverkningskostnaderna kunnat påverkas i avsedd riktning, och ibland har resultatet blivit det motsatta.

Bland orsakerna till de ofta underskattade problemen med de nya maskintyperna kan främst nämnas sämre driftsäkerhet och högre underhållskostnader (reparation och skötsel), ofta i kombination med lägre produktion än man kalkylerat med.

För att studera dessa frågor har författaren genomfört ett forskningsprojekt "Availability of New Logging Machines and Causes of Non-Productive Time" vid the Logging Research Division, Pulp and Paper Research Institute of Canada, Montreal.

Undersökningarna har syftat till att:

- ☐ identifiera parametrar av betydelse för optimering av tekniskt avancerade skogsmaskiners driftsäkerhet och tillgänglighet,
- ☐ utveckla metoder för mätning, värdering och analys av dessa parametrar,
- ☐ prova och tillämpa dessa metoder på nya avverkningsmaskiner i ordinarie drift.

Problemet att till rimliga kostnader hålla tekniskt avancerade maskiner i funktionsdugligt skick under krävande yttre förhållanden är inte unikt för skogsbruket. Genom modifiering och tillämpning av erfarenheter från andra områden, bl.a. US Air Force och Army, har i projektet utvecklats metoder som gör det möjligt att analysera, dels hur

en avverkningsmaskins maskinella tillgänglighet påverkas av funktionssäkerheten (MTBF, mean-time-between-failures) och av underhållsmässigheten (MTTR, mean-time-to-repair), och dels hur maskinens utnyttjande för avsedd produktion i praktiken (dvs. den tekniska utnyttjandegraden) påverkas av dessa maskinparametrar samt av operativa parametrar, främst underhållsorganisationens och drivningsorganisationens effektivitet.

Med utnyttjande av en begränsad men adekvat mängd fältdata beträffande drifts-avbrott, underhållskostnader och produktion, insamlade enligt en noggrant specificerad metodik, kan de sökta parametrarna kvantifieras. Dessutom kan kostnaden för maskinstillestånd, dvs. för förlorad produktion, beräknas, liksom den indirekta gränskostnaden för en höjning av den tekniska utnyttjandegraden. Detta gör det möjligt att utföra optimeringsanalyser av maskinens användning, i syfte att prioritera effektivitetshöjande åtgärder och bestämma den optimala insatsen av maskin- och operativa parametrar.

De utvecklade metoderna har använts vid studium av ett tjugotal Koehring Short-Wood Harvesters i ordinarie drift hos skogsföretag i östra Canada. (Koehring Harvester är en enmansbetjänad kanadensisk skördare, världens första och enda i sitt slag, för fällning, automatisk kvistning och kapning, samt terrängtransport av virket. Vikten är ca 45 ton olastad och priset ca C\$ 150 000.)

Erfarenheterna från tillämpningen av metoderna på Koehring Harvester under tre års tid visar, att de med dator rutinmässigt och fortlöpande utförda analyserna, kan ge brukare och tillverkare av maskiner en lättförståelig men tillräckligt adekvat information, dels för objektiv provning av maskiner under utveckling, och dels vid kontinuerlig uppföljning av maskiner i ordinarie drift.

Summary

The greater part of the total wood costs consists of costs of logging. In order to control these costs, the attempts toward full mechanization of logging operations have been intensified during the last years, and machines have been developed, particularly in North America and Sweden, for felling, limbing and bucking (i.e., cross-cutting). The effects on the costs of logging, however, of this introduction of technically complex machines such as processors and harvesters, have so far generally been limited or even negative. The main reason for the relative failure of these rather sophisticated machines is lower availability and higher costs of maintenance (i.e., repair and service), often in combination with lower productivity than expected.

In order to study these problems, the author has carried out a research program "Availability of New Logging Machines and Causes of Non-Productive Time", at the Logging Research Division, Pulp and Paper Research Institute of Canada, Pointe Claire, Montreal.

The objectives of the studies have been to:

- ☐ identify parameters of importance for optimizing machine availability
- ☐ develop methods for measurement, evaluation and analysis of these parameters
- ☐ test and apply these methods on new logging machines on regular operations

The problem of keeping technically complex machinery in operative condition at moderate costs is not unique to logging operations. By modifying and applying the experience from other areas, mainly the US Air Force and Army, in the project, methods have been developed that make it possible to analyse how the Mechanical Availability of a logging machine is being influenced by machine reliability (MTBF, mean-time-

between-failures) and by machine maintainability (MTTR, mean-time-to-repair), and furthermore how the exploitation of the machine for intended production in practice (i.e., machine utilization) is being influenced by these machine parameters and by operational parameters (field organization efficiency, i.e., maintenance support and operational support efficiency).

By making use of a limited but adequate amount of field data on machine failures, downtime, maintenance costs and production, collected according to a specified and carefully controlled methodology, these machine- and operational parameters can be quantified. In addition, the cost of machine downtime, i.e., the cost of lost production, can be calculated, as well as the indirect marginal cost of an increase in utilization. This makes it possible to carry out optimizing analyses of the machine operation, in order to establish the priority of measures intended to improve the operational efficiency, and to determine the optimum investment in machine- and operational parameters.

These procedures have been applied in studies of some 20 Koehring Short-Wood Harvesters on regular logging operations in eastern Canada. (The Koehring Harvester, produced in Canada, is a one-man harvester for felling, automatic limbing and bucking into 8-foot bolts, and forwarding. The Harvester, the world's first and so far only of this kind, weighs 90,000 lb. unloaded, and the purchase price is about C\$ 150,000.)

The experience of this application of the procedures on the Koehring Harvester for a period of three years has proved, that the routine computer analysis developed can give information, easily understandable but adequate enough, to users and manufacturers of machines, for unbiased testing of ma-

chines under development as well as for continuous follow-up of machines on regular operations.

This report summarizes the main results of the studies. The results are presented in a series of Bi-weekly Reports from the Logging Research Division at the Pulp and Paper Research Institute of Canada, and in regular Institute reports, mainly:

Axelsson, S.-A. Repair Statistics and Performance of New Logging Machines: Koehring Short-Wood Harvester/report 1. Logg. Res. Rep. Pulp Pap. Res. Inst. Can., LRR/47, 1972, pp. 59.

Axelsson, S.-A. Logging-Machine Failure Avoidance: Identification and Measurement of Key Parameters. Logg. Res. Rep. Pulp Pap. Res. Inst. Can., LRR/48, 1972, pp. 78.

Litteraturförteckning

1. **ANON: ASAE Standard S322.** Uniform terminology for agricultural machinery management. American Society of Agricultural Engineers, June 1969. pp. 2.
2. **ANON: Canadair Limited.** Reliability seminar for designers. Reliability, Safety and Maintainability Group, S.P. 322, Montreal, September 1966. pp. 31.
3. **ANON: Canadair Limited.** Reliability/Maintainability seminar for suppliers. Reliability, Safety and Maintainability Group, S.P. 343, Montreal, May 1967. pp. 44.
4. **ANON: Forskningsstiftelsen Skogsarbeten.** (The Swedish Logging Research Foundation.) Tidsbegrepp för maskinarbete (Standard definitions for elements of machine time). Skogsarbeten, Stockholm, 1969. pp. 12.
5. **ANON: Headquarters, Department of the Army.** Research and development of material-maintainability engineering. Department of the Army Pamphlet 705-1, Washington, D.C., June 1966. pp. 262.
6. **ANON: Joint Committee on Forest Working Techniques and Training of Forest Workers.** Protocol for the testing of forest tractors. FAO/EFC/LOG/64, Geneva, 1960. pp. 41.
7. **ANON: Logging Operations Group, CPPA.** Outline for the preparation of Logging Operations Group Progress Reports. Woodl. Sect. Canad. Pulp Pap. Ass., January 5, 1970. pp. 3 & 3 appendices.
8. **ANON: CPPA.** Logging equipment maintenance. Woodl. Sect. Canad. Pulp Pap. Ass., Task Force Report, December 1970. pp. 43.
9. **ANON: Logistics Management Institute.** Guidelines for making repair expenditure decisions. AD. 681 701. U.S. Department of Commerce/National Bureau of Standards, November 1968. pp. 34 & 6 appendices.
10. **ANON: Metsäteho.** (The National Finnish Testing Institute for Agricultural Machinery.) Rush testing results of forest machinery—Kockum Brunett KL-836 B Forwarder. Testing report 11/1970, Helsinki, 1970. pp. 11.
11. **ANON: Organization for Economic Cooperation and Development.** O.E.C.D. standard code for the official testing of agricultural tractors, No. 79. O.E.C.D. Publications, Paris, July 1966. pp. 50.
12. **ANON: Society of Automotive Engineers.** Reliability control in aerospace equipment development. Technical Progress Series, volume 4, New York 1964. pp. 185.
13. **ANON: Statens Maskinprovningar.** (The National Swedish Testing Institute for Agricultural Machinery.) Skotare BM-Volvo SM 668. (Forwarder BM-Volvo 668.) Testing report 2036, Umeå, January 1970. pp. 19.
14. **ANON: Sveriges Standardiseringskommision.** (The Swedish Standards Association.) Tillförlitlighetsteknik. Ordlista. (Reliability. Terminology.) Svensk standard SEN 410505, Stockholm, December 1971. pp. 14.
15. **Axelsson, S.-A.** Evaluation of Logging-Machine Prototypes: Arbomatik Processor. Woodl. Res. Rep. Pulp Pap. Res. Inst. Can., WR/35, 1971. pp. 18.
16. — Repair Statistics and Performance of New Logging Machines: Koehring Short-Wood Harvester/Report 1. Logg. Res. Rep. Pulp Pap. Res. Inst. Can., LRR/47, 1972. pp. 59.
17. — Logging-Machine Failure Avoidance: Identification and Measurement of Key Parameters. Logg. Res. Rep. Pulp Pap. Res. Inst. Can., LRR/48, 1972. pp. 78.
18. **Axelsson, S.-A., and Nelson, L.** Collection and Reporting of Field Data. Repair Statistics Program—Koehring Short-Wood Harvester. Pulp. Pap. Res. Inst. Can., May/1972. pp. 34.
19. — Compilation of Field Data from Bi-weekly Reports No. 1—14. Repair Statistics Program—Koehring Short-Wood Harvester. Pulp Pap. Res. Inst. Can., May/1972. pp. 102.
20. — Bi-weekly Reports No. 1—24. Repair Statistics Program—Koehring Short-Wood Harvester. Pulp Pap. Res. Inst. Can., Aug. 1971—July 1972.
21. **Bartter, B. R.** Planning a woodlands maintenance program—an equipment manufacturer's view. Woodl. Sect. Canad. Pulp Pap. Ass., February 1971. pp. 14.
22. **Beatty, W. F.** The Koehring KH III B Harvester. Woodl. Sect. Canad. Pulp Pap.

- Ass., Equipment Progress Report, Index No. 2592 (B-7-c), November 1970. pp. 10.
23. **Bennett, W. D.** Identification and measurement of key environmental and operating factors on logging operations. Woodl. Rep. Pulp Pap. Res. Inst. Can. No. 30, December 1970. pp. 21.
24. **Berard, J. A., Dibblee, D. H. W., and Horncastle, D. C.** Standard definitions for machine availability and utilization. Woodl. Sect. Canad. Pulp Pap. Ass., Index No. 2428 (B-1), January 1968. pp. 2.
25. **Berlyn, R. W., and Keen, R. E.** A method of recording vehicle activity. Pulp Pap. Res. Inst. Can., Research Note No. 40, January 1964. pp. 18.
26. **Bredberg, C.-J.** Evaluation of logging-machine prototypes: Koehring Short-Wood Harvester. Woodl. Rep. Pulp Pap. Res. Inst. Can. No. 28, October 1970. pp. 15.
27. **Collins, C. W.** Maintenance management for sophisticated ground transportation vehicles. 1971 Winter Simulation Conference (Fifth Conference on Application of Simulation), New York. pp. 8.
28. **Davy, M. F.** Engineering cognizance analysis report—CL41 landing gear and hydraulic systems. Canadair Ltd., Montreal, Report No. TSR-35, June 1969. pp. 73.
29. **Driggs, L. H. and Forry, J. E.** A designer's view of combat aircraft reliability. Society of Automotive Engineers, New York, Paper No. 38, 1953. pp. 6.
30. **Earles, D. R., and Eddins, M. F.** Reliability engineering data series. Avco Corporation, Research and Advanced Development Division, 1962. pp. 179.
31. **Gabriel, W. J.** Logging equipment replacement. The Northern Logger and Timber Processor, No. 19, 1970 (12-21).
32. **Haviland, R. P.** Introduction to the theory of reliability. Society of Automotive Engineers, New York, Paper 343D, 1961. pp. 5.
33. **Hunt, D. A.** Fortran program for selecting farm equipment. Agricultural Engineering, June 1967 (332-335).
34. **Kurelek, J., and Denovan, J.** Koehring Harvester for pulpwood. Society of Automotive Engineers, New York, Paper No. 690554, August 1969. pp. 8.
35. **Lowery, E. E. and Blanchard, B. S.** Organization for maintainability—Volume I: Management. General Dynamics Corporation, Electronics Division, August 1967. pp. 93.
36. — Organization for maintainability—Volume V: Maintainability demonstration. General Dynamics Corporation, Electronics Division, August 1967. pp. 48.
37. **McColl, B. J.** A systems approach to some industry problems. Woodl. Sect. Canad. Pulp Pap. Ass. Index No. 2558 (B-1) O.D.C. 31, September 1969. pp. 56.
38. **Morris, R. S.** Maintainability engineering simulation system. 1971 Winter Simulation Conference (Fifth Conference on Application of Simulation), New York. pp. 8.
39. **Nelson, L.** Manual for trouble shooting and repair of the DSR Servis Recorder. Pulp Pap. Res. Inst. Can., February 1971. pp. 25.
40. **Olsen, N. C.** The need for uniform standards for forest equipment. Agricultural Engineering No. 12, December 1970 (706-707).
41. **Peterson, M. B.** Literature search and critical review of mechanical failure. Mechanical Technology, Incorporated, AD. 708764. U.S. Department of Commerce, National Technical Information Service, July 1970. pp. 212.
42. **Puzey, G. A., and Hunt, D.** Field machine repair cost pattern. American Society of Agricultural Engineers, Paper No. 66-673, December 1966. pp. 22.
43. **Ryan, W. J. L.** Price theory. Macmillan and Co. Ltd., London, 1964 (50-79).
44. **Simpson, B. H.** Reliability methods and application at Ford Motor Company. Product Design & Value Engineering, October 1966 (28-47).
45. **Soanes, R. W.** A simple stochastic replacement model. Benet R. & E. Laboratories, Technical Report WVT-7040. U.S. Army Weapons Command, June 1970. pp. 46.
46. **Southwell, P. H.** An analysis of tractor purchase costs and efficiencies. American Society of Agricultural Engineering, Paper No. 61-124, June 1967. pp. 12 & 4 appendices.
47. **Welker, E. L., et al.** The dollar value of improved reliability. Arinc Research Corporation, AD. 708 539. U.S. Department of Commerce/National Bureau of Standards. August 1960. pp. 51.
48. **Williams, N. R.** Implications of mechanization. Woodl. Sect. Canad. Pulp. Pap. Ass., WS 2594 (B-1) O.D.C. 66, March 1971. pp. 5.